



**Afyonkarahisar'da Bir Biyogaz Enerji
Tesisinin Termodinamik Modellemesi ve
Termoekonomik Optimizasyonu**

DOKTORA TEZİ

Muhammed ARSLAN

Danışman

Doç. Dr. Ceyhun YILMAZ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2022

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**AFYONKARAHİSAR'DA BİR BİYOGAZ ENERJİ TESİSİNİN
TERMODİNAMİK MODELLEMESİ VE TERMOEKONOMİK
OPTİMİZASYONU**

Muhammed ARSLAN

Danışman

Doç. Dr. Ceyhun YILMAZ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2022

TEZ ONAY SAYFASI

Muhammed ARSLAN tarafından hazırlanan “Afyonkarahisar'da Bir Biyogaz Enerji Tesisinin Termodinamik Modellemesi ve Termoekonomik Optimizasyonu” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 13/05/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Ceyhun YILMAZ

Başkan : Prof. Dr. Ali BOLATTÜRK
Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Mehmet KANOĞLU
Alaaddin Keykubat Üniversitesi,
Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Muhammet YÜRÜSOY
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Prof. Dr. İbrahim MUTLU
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Ceyhun YILMAZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

13 / 05 /2022

Muhammed ARSLAN

ÖZET

Doktora Tezi

AFYONKARAHİSAR'DA BİR BİYOGAZ ENERJİ TESİSİNİN TERMODİNAMİK MODELLEMESİ VE TERMOEKONOMİK OPTİMİZASYONU

Muhammed ARSLAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ceyhun YILMAZ

Bu tezde, Afyonkarahisar'da bir biyogaz enerji santralinin termodinamik modellemesi ve termoeconomik optimizasyonu yapılmıştır. Dört gaz motoruna sahip santral günlük 96 ton tavuk gübresiyle 4000 kW güç üretmektedir. Santralde kullanılan ön ısıtmalı gaz çevriminde egzoz gazları türbinden sonra bir kez kullanmakta ve atmosfere salınmaktadır. Halen yüksek enerjiye sahip egzoz gazlarının atık ısını kullanmak ve çevreye daha az gaz salınımı için mevcut santral termodinamik ve termoeconomik olarak optimize edilmiştir. Bu amaçla egzoz gazlarının atık ısını geri kazanmak için mevcut santrale entegre edilebilecek üç model geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerin detaylı termodinamik analizi yapılarak elde edilen veriler ile termoeconomik analiz ve optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Sistemlerin analiz ve optimizasyonları EES (Engineering Equation Solver) yazılımında yapılmış ve elde edilen veriler ile sistemlerin Aspen Plus yazılımında detaylı enerji ve ekonomik simülasyonları yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Model 1'de atık egzoz gazlarını kullanarak fazladan elektrik üretmek için bir ORC (Organic Rankine Cycle) ünitesi önerilmiştir. Model 2'de elektrik üretimine ek olarak atık egzoz gazlarını kullanarak ısıtma ve soğutma yapmak için bir ısıtma ve bir soğutma ünitesi önerilmiştir. Model 3'de atık egzoz gazlarından elektrik üretimi için ORC ile birlikte biyogazın yan ürünlerinden ve fazla elektriğin depolanması amacıyla egzoz gazlarıyla ön ısıtma yapılarak sudan hidrojen üretimi önerilmiştir. Optimize edilmiş santralin termodinamik ve termoeconomik analiz sonuçlarına göre, Model 1'in enerji ve ekserji verimleri %50.74 ve %44.47'dir. 5043 kW net güç üretilerek birim elektrik maliyeti 0.03778 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Model 2'nin

güç kapasitesi, enerji ve ekserji verimleri sırasıyla 4000 kW, %74.88 ve %50.62'dir. Üretilen elektriğin, yapılan ısıtmanın ve soğutmanın birim maliyetleri sırasıyla 0.04176 \$/kWh, 0.0352 \$/kWh ve 0.0178 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Model 3'ün net güç kapasitesi, enerji ve ekserji verimleri sırasıyla 5792 kW, % 41.55 ve % 36.42'dir. Üretilen elektriğin birim maliyeti 0.03922 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Son olarak ORC'de üretilen elektrik kullanılarak biyogaz yan ürünlerinden üretilen hidrojenin kütleli debisi ve birim maliyeti ise sırasıyla 0.007447 kg/s ve 3.191 \$/kg olarak hesaplanmıştır.

2022, xv + 136 sayfa

Anahtar Kelimeler: Biyogaz, Termodinamik analiz, Termoeconomik analiz, Optimizasyon.

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

THERMODYNAMIC MODELING AND THERMOECONOMIC OPTIMIZATION OF A BIOGAS POWER PLANT IN AFYONKARAHİSAR

Muhammed ARSLAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Automotive Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Ceyhun YILMAZ

This thesis carried out thermodynamic modeling and thermoeconomic optimization of a biogas power plant in Afyonkarahisar. The power plant has four gas engines and produces 4000 kW of power with 96 tons of chicken manure daily. In the preheated gas cycle used in the power plant, the exhaust gases are used once after the turbine and released into the atmosphere. The existing power plant has been optimized thermodynamically and thermoeconomically to use the waste heat of the exhaust gases, which still have high energy and less gas emission to the environment. For this purpose, three models have been developed that can be integrated into the existing power plant to recover the waste heat of exhaust gases. Thermoeconomic analysis and optimization are performed with the data obtained by making a detailed thermodynamic analysis of the developed models. Analyzes and optimizations of the systems are performed in EES (Engineering Equation Solver) software, and the results are compared by making detailed energy and economic simulations of the systems in Aspen Plus software with the data obtained. In Model 1, it is proposed to integrate ORC (Organic Rankine Cycle) to produce additional electricity using the waste heat of exhaust gases. In Model 2, a heating unit and a cooling unit have been proposed for heating and cooling by using waste exhaust gases in addition to electricity generation. In Model 3, hydrogen production is proposed to produce electricity from waste heat of the exhaust gases, together with ORC, from the by-products of biogas and preheating with exhaust gases to store excess electricity from water. According to the thermodynamic and thermoeconomic analysis results of the optimized power plant, the energy and exergy

efficiencies of Model 1 are 50.74% and 44.47%. By producing 5043 kW of net power, the unit electricity cost has been calculated as 0.03778 \$/kWh. The power capacity, energy and exergy efficiencies of Model 2 are 4000 kW, 74.88% and 50.62%, respectively. Unit costs of electricity produced, heating and cooling have been calculated as 0.04176 \$/kWh, 0.0352 \$/kWh and 0.0178 \$/kWh, respectively. The net power capacity, energy and exergy efficiencies of the Model 3 are 5792 kW, 41.55% and 36.42%, respectively. The unit cost of the electricity produced has been calculated as 0.03922 \$/kWh. Finally, the mass flow rate and unit cost of hydrogen produced from biogas by-products by using the electricity produced in ORC were calculated as 0.007447 kg/h and 3.191 \$/kg, respectively.

2022, xv + 136 pages

Keywords: Biogas, Thermodynamic analysis, Thermo-economic analysis, Optimization.

TEŐEKKÖR

Bu çalıőmanın baőlangıcından son noktasına kadar ilgisini, bilgisini, tecrűbesini ve samimiyetini vakit gűzetmeksizin esirgemeyen deęerli danıőman hocam Doç. Dr. Ceyhun YILMAZ'a teőekkűr ediyorum. Varlıęıyla, muhabbetiyle ve destekleriyle yanımda olan ve tez bitimine doęru dűnyanın en gűzel hediyesi oęlumuzu dűnyaya getiren eőim Selma ARSLAN'a, ve dűnyama girerek yaőama sevincimi katbekat artıran oęlum Miraç ARSLAN'a sonsuz sevgi ve teőekkűrlerimi sunuyorum. Doęduęumdan beri maddi ve manevi desteklerini daima hissettiren ve tez sűrecinde de bu desteklerini eksik etmeyen annem Suna ARSLAN'a, babam Nuri ARSLAN'a ve aęabeyim Yaőar ARSLAN ile ailesine saygı ve teőekkűrlerimi sunuyorum.

Muhammed ARSLAN
Afyonkarahisar 2022

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
RESİMLER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Motivasyon	1
1.2 Tezin Amaçları	3
1.3 Tezin Ana Teması ve Yaklaşımı.....	4
1.4 Genel Tez İçeriği	5
1.5 Literatür Araştırması.....	7
1.6 Tavuk Gübresinin Biyogaz Üretiminde Kullanılması	15
2. BİYOKÜTLE ve TÜRKİYE’DE BİYOKÜTLE POTANSİYELİ	19
3. TERMODİNAMİK ANALİZ	27
4. TERMOEKONOMİK ANALİZ.....	36
4.1 Ekonomik Analiz	36
4.2 Termoekonominin Esasları	38
5. OPTİMİZASYON	41
6. AFYON ENERJİ – GÜBRE SANTRALİ ve TASARLANAN MODELLER	49
6.1 Afyon Enerji – Gübre Santrali	49
6.2 Tasarlanan Modellerin Termodinamik Tanımları ve Çalışma Prensipleri	53
6.2.1 Model 1’in Termodinamik Tanıtımı ve Çalışma Prensipleri	53
6.2.2 Model 2’nin Termodinamik Tanıtımı ve Çalışma Prensipleri	60
6.2.3 Model 3’ün Termodinamik Tanıtımı ve Çalışma Prensipleri	67
6.3 Tasarlanan Modellerin Termoekonomik Analizleri	70
6.3.1 Model 1’in Termoekonomik Analizi	70
6.3.2 Model 2’in Termoekonomik Analizi	72
6.3.3 Model 3’ün Termoekonomik Analizi.....	75

7. MODELLERİN TERMODİNAMİK ANALİZ SONUÇLARI.....	77
7.1 Model 1 İçin Termodinamik Analiz Sonuçları	77
7.1.1 Model 1 İçin Mevcut Gaz Çevrimi Termodinamik Analiz Sonuçları.....	77
7.1.2 Model 1 için Termodinamik Analiz Sonuçları	79
7.2 Model 2 İçin Termodinamik Analiz Sonuçları	86
7.3 Model 3 İçin Termodinamik Analiz Sonuçları	91
7.3.1 Model 3 İçin Mevcut Gaz Çevrimi Termodinamik Analiz Sonuçları.....	91
7.3.2 Model 3 İçin Termodinamik Analiz Sonuçları	92
8. TERMOEKONOMİK ANALİZ SONUÇLARI.....	101
8.1 Model 1 İçin Termoekonomik Analiz Sonuçları	101
8.2 Model 2 İçin Termoekonomik Analiz Sonuçları	103
8.3 Model 3 İçin Termoekonomik Analiz Sonuçları	105
9. OPTİMİZASYON SONUÇLARI	108
9.1 Model 1 İçin Optimizasyon Sonuçları	109
9.2 Model 2 İçin Optimizasyon Sonuçları	111
9.3 Model 3 İçin Optimizasyon Sonuçları	116
10. TARTIŞMA ve SONUÇ	120
10.1 Validasyon	123
11. KAYNAKLAR.....	125
11.1 İnternet Kaynakları	133
ÖZGEÇMİŞ.....	135

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

c	Birim akış maliyeti (\$/GJ)
C	Karbon
C	Satın alma maliyeti (\$)
\dot{C}	Ekserji maliyet oranı (\$/h)
CH_4	Metan
CH_2O	Formaldehit
$C_xH_yO_z$	Organik madde
$C_{L,OM}$	Seviyelendirilmiş işletme ve bakım maliyeti (\$)
CO	Karbon monoksit
CO_2	Karbon dioksit
∂	Diferansiyel
ex	Özgül ekserji (kJ/kg)
E	10^{\wedge}
E	Enerji (kJ)
\dot{E}_x	Ekserji (kW)
F	Faraday sabiti (C/mol)
g	Yer çekimi ivmesi (m/s^2)
G	Gibbs serbest enerjisi (kJ/kmol)
h	Özgül entalpi (kJ/kg)
H	Entalpi (kW)
H_2	Hidrojen
H_2O	Su
H_2S	Hidrojen sülfür
H_2SO_4	Sülfürik asit
J	Akım yoğunluğu (A/cm^2)
₺	Türk Lirası
$LiBr$	Lityum bromür
\dot{m}	Kütlesel debi (kg/s)
n	Santral ömrü (yıl)
N/N_2	Azot veya nitrojen
NH_3	Amonyak
O_2	Oksijen
P	Basınç
P	Fosfor
pH	Potential hydrogen
r_n	Nominal artış oranı
\dot{Q}	Isıl güç (kW)
s	Özgül entropi (kJ/kgK)
S	Entropi (kJ/K)
SO_2	Kükürt dioksit
t	Santralin operasyon süresi (saat)
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$ veya K)
u	Özgül iç enerji (kJ/kg)

Simgeler (Devam)

v	Özgül hacim (m^3/kg)
V	Hacim (m^3)
V'	Gerilim (Volt)
\dot{W}	Güç (kW)
x_k	k. bileşenin fraksiyonu
z	Yükseklik (metre)
\dot{Z}	Toplam sermaye yatırım ve işletme ve bakım maliyet oranı (\$/h)
Z_C	Karbonun molekül içindeki ağırlık fraksiyonu
Z_H	Hidrojenin molekül içindeki ağırlık fraksiyonu
\dot{Z}_k^{CI}	k. bileşenin sermaye yatırım maliyeti (\$/h)
\dot{Z}_k^{OM}	k. bileşenin işletme ve bakım maliyeti (\$/h)
Z_O	Oksijenin molekül içindeki ağırlık fraksiyonu
$\$$	Amerikan doları
Σ	Toplam sembolü
Δ	Değişim
ϱ	Hız (m/s)
η_{enerji}	Enerji verimi (%)
$\eta_{ekserji}$	Ekserji verimi (%)
$\mathcal{E}_{kullanım}$	Kullanım faktörü (%)
0	Ölü hal (indis)
$^{\circ}C$	Santigrad

Kısaltmalar

CHP	Combined heat and power (Birleşik ısı ve güç)
CCHP	Combined cooling heat and power (Birleşik soğutma, ısı ve güç)
COP	Coefficient of performance (Performans katsayısı)
CRF	Sermaye geri kazanım faktörü
\checkmark	Çıkan (indis)
dk	Dakika
EES	Engineering equation solver
F	Fuel (Yakıt) (indis)
Fiz.	Fiziksel
Fr	Fraksiyon
GASKİ	Gaziantep Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü
GÇ	Güç çevrimi
GJ	Gigajoule
g	Giren (indis)
gr	Gram
h	Hour (saat)
HDPE	High density poly ethylene (Yüksek yoğunluklu polietilen)
HV	Heat Value (kJ/kg) (Isıl değer)
HYO	Hava yakıt oranı
i	Faiz oranı
K	Kelvin
kg	Kilogram

Kısaltmalar (Devam)

Kim.	Kimyasal
Kin.	Kinetik
kmol	Kilomol
kPa	Kilopascal
kW	Kilowatt
kWe	Kilowatt elektrik
L	Litre
MJ	Megajoule
mL	Mililitre
MMBTU	1 million british thermal unit
MPa	Megapascal
MW	Megawatt
<i>MW</i>	Molar weight
P	Product (indis)
Pa	Pascal
Pot.	Potansiyel
OFC	Organic flash cycle (Organik flaş çevrimi)
OMC	İşletme ve bakım maliyeti
ORC	Organic rankine cycle (Organik rankin çevrimi)
s	Saniye
SOFC	Solid oxide fuel cell (Katı oksit yakıt hücresi)
SPECO	Specific exergy cost (Birim ekserji maliyetlendirmesi)
ST	Solar thermal input (Solar termal girişi)
TEP	Ton eşdeğer petrol
TRR	Total revenue requirement (Toplam gelir gereksinimi)
<i>tr</i>	Tersinir (indis)
VS	Volatile solid (Uçucu katı)
YO	Yanma odası

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Türkiye’deki hayvan sayısının illere göre dağılımı	22
Şekil 2.2 Türkiye’deki hayvansal atıklarının illere göre dağılımı (ton/yıl).....	23
Şekil 2.3 Türkiye’deki bitkisel atıklarının illere göre dağılımı (ton/yıl).....	23
Şekil 2.4 Türkiye’deki belediye atıklarının illere göre dağılımı	24
Şekil 2.5 Türkiye’deki orman varlığı atıklarının illere göre dağılımı	25
Şekil 2.6 Türkiye’deki biyokütle kaynaklı lisanslı elektrik üretim santrallerinin illere göre dağılımı (MWe)	26
Şekil 2.7 Türkiye’deki biyokütle kaynaklı lisanssız elektrik üretim santrallerinin illere göre dağılımı (kWe).....	26
Şekil 5.1 Min./Maks. arayüzü	45
Şekil 5.2 Variable Info arayüzü.....	45
Şekil 6.1 Mevcut santralin şematik görünümü.....	53
Şekil 6.2 Model 1’in şematik görünümü ve çalışma prensibi	55
Şekil 6.3 Model 2’nin şematik görünümü ve çalışma prensibi.....	62
Şekil 6.4 Model 3’ün şematik görünümü ve çalışma prensibi	69
Şekil 7.1 Model 1 için mevcut gaz çevrimine giren yakıt ekserjisinin akışı ve ekserji akışında her bir ekipmanın fraksiyonu.....	78
Şekil 7.2 Model 1 için ORC’de test edilen çalışma akışkanlarının performans değerleri	80
Şekil 7.3 Model 1 için her bir ORC çalışma akışkanının T – s diyagramı.....	82
Şekil 7.4 Model 1’de santrale giren yakıt ekserjisinin akışı ve ekserji akışında her bir ekipmanın fraksiyonu	83
Şekil 7.5 Model 1’in Aspen Plus yazılımında şematik görünümü ve simülasyonu	85
Şekil 7.6 Model 2’de santrale giren yakıt ekserjisinin akışı ve ekserji akışında her bir ekipmanın fraksiyonu	88
Şekil 7.7 Model 2’nin Aspen Plus yazılımında şematik görünümü ve simülasyonu	89
Şekil 7.8 Model 2’nin Aspen Plus yazılımında şematik görünümü ve simülasyonu	90
Şekil 7.9 Model 3 için mevcut gaz çevrimine giren yakıt ekserjisinin akışı ve ekserji akışında her bir ekipmanın fraksiyonu.....	92
Şekil 7.10 Model 3 için ORC’de test edilen çalışma akışkanlarının performans değerleri	94
Şekil 7.11 Model 3 için her bir ORC çalışma akışkanının T – s diyagramı.....	95
Şekil 7.12 Model 3’te santrale giren yakıt ekserjisinin akışı ve ekserji akışında her bir ekipmanın fraksiyonu	96

Şekil 7.13 Model 3'te gaz çevrimi ve ORC ünitesinin Aspen Plus yazılımında şematik görünümü ve simülasyonu	98
Şekil 7.14 Elektroliz ünitesinin Aspen Plus yazılımında şematik görünümü ve simülasyonu	99
Şekil 7.15 Model 3'ün Aspen Plus yazılımında şematik görünümü ve simülasyonu ..	100
Şekil 9.1 EES'de genetik bir yöntem kullanılarak gerçekleştirilen sistem optimizasyonunun akış şeması.....	109
Şekil 9.2 Model 1 için sıkıştırma oranına bağlı olarak yakıt tüketiminin değişimi	110
Şekil 9.3 Model 1 için HYO'ya bağlı olarak yakıt tüketiminin değişimi	110
Şekil 9.4 Model 1'in termodinamik performans değişimi	111
Şekil 9.5 Model 2 için sıkıştırma oranının verimler üzerindeki etkisi	112
Şekil 9.6 Model 2 için HYO'nun verimler üzerindeki etkisi	112
Şekil 9.7 Model 2'nin termodinamik performans değişimi	113
Şekil 9.8 Model 2 için sıkıştırma oranının birim maliyetler üzerindeki etkisi.....	114
Şekil 9.9 Model 2 için HYO'nun birim maliyetler üzerindeki etkisi.....	115
Şekil 9.10 Model 2 için soğutma ünitesi düşük basıncının birim soğutma maliyetine etkisi.....	116
Şekil 9.11 Model 3 için HYO'nun santral gücüne etkisi	117
Şekil 9.12 Model 3 için sıkıştırma oranının santral gücüne etkisi.	117
Şekil 9.13 Model 3 için ön ısıtıcı sıcaklığının santral gücüne etkisi.	118
Şekil 9.14 Model 3'ün termodinamik performans değişimi.....	118

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Türkiye’deki biyokütle potansiyeli	21
Çizelge 3.1 Santrale ait termodinamik özellikler ve kabuller	35
Çizelge 6.1 ORC ünitesinde test edilen akışkanların özellikleri	56
Çizelge 6.2 Model 1 için bileşen ve kojenere sistem düzeyinde enerji, ekserji ve debi analizi için kullanılan termodinamik eşitlikler	57
Çizelge 6.3 Model 2 için bileşen ve CCHP sistem düzeyinde enerji, ekserji ve debi analizi için kullanılan termodinamik eşitlikler	63
Çizelge 6.4 Model 1 için ekipman satın alma ve kurulum maliyetleri.....	71
Çizelge 6.5 Model 2 için ekipman satın alma ve kurulum maliyetleri.....	73
Çizelge 6.6 Model 3 için ekipman satın alma ve kurulum maliyetleri.....	75
Çizelge 7.1 Model 1 için mevcut gaz çevriminin kararlı durum değerleri.....	77
Çizelge 7.2 Model 1 için mevcut gaz çevriminin performans değerleri	77
Çizelge 7.3 Model 1 için mevcut gaz çevrimi ekipmanlarının toplam ekserji yıkımındaki fraksiyonları.....	78
Çizelge 7.4 Model 1’in kararlı durum değerleri.....	79
Çizelge 7.5 Model 1 için optimize gaz çevriminin performans değerleri	79
Çizelge 7.6 Model 1 için ORC’de test edilen çalışma akışkanlarının performans değerleri	80
Çizelge 7.7 Model 1’in performans değerleri	81
Çizelge 7.8 Model 1’in toplam ekserji yıkımı ve ekipmanların toplam ekserji yıkımındaki fraksiyonları.....	83
Çizelge 7.9 Model 2’nin kararlı durum değerleri.....	86
Çizelge 7.10 Model 2’nin performans değerleri	87
Çizelge 7.11 Model 2’de toplam ekserji yıkımı ve ekipmanların toplam ekserji yıkımındaki fraksiyonları.....	88
Çizelge 7.12 Model 3 için mevcut gaz çevriminin kararlı durum değerleri.....	91
Çizelge 7.13 Model 3 için mevcut gaz çevriminin performans değerleri	91
Çizelge 7.14 Model 3 için mevcut gaz çevrimi ekipmanlarının toplam ekserji yıkımındaki fraksiyonları.....	92
Çizelge 7.15 Model 3’ün kararlı durum değerleri	93
Çizelge 7.16 Model 3 için optimize gaz çevriminin performans değerleri	93
Çizelge 7.17 Model 3 için ORC’de test edilen çalışma akışkanlarının performans değerleri	94
Çizelge 7.18 Model 3’ün performans değerleri.....	95

Çizelge 7.19 Model 3 için toplam ekserji yıkımı ve ekipmanların toplam ekserji yıkımındaki fraksiyonları.....	96
Çizelge 7.20 Elektroliz ünitesinin termodinamik analiz sonuçları.....	97
Çizelge 8.1 Model 1 için toplam maliyet oranları.....	101
Çizelge 8.2 Model 1 için mevcut gaz çevriminin birim maliyet oranları, ekserji ve ekserji maliyetleri	102
Çizelge 8.3 Model 1'in birim maliyet oranları, ekserji ve ekserji maliyetleri	102
Çizelge 8.4 Model 2 için toplam maliyet oranları.....	103
Çizelge 8.5 Model 2'nin birim maliyet oranları, ekserji ve ekserji maliyetleri	104
Çizelge 8.6 Model 3 için toplam maliyet oranları.....	105
Çizelge 8.7 Model 3 için mevcut gaz çevriminin birim maliyet oranları, ekserji ve ekserji maliyetleri	105
Çizelge 8.8 Model 3'ün birim maliyet oranları, ekserji ve ekserji maliyetleri	106
Çizelge 8.9 Elektroliz ünitesinin termoeconomik sonuçları	107
Çizelge 9.1 Model 1 ve mevcut gaz çevrimi için termodinamik sonuçlar	110
Çizelge 9.2 Model 1 ve mevcut gaz çevrimi için termoeconomik sonuçlar	111
Çizelge 9.3 Model 2 ve entegre edilen üniteler için termodinamik sonuçlar.....	113
Çizelge 9.4 Model 2 ve mevcut gaz çevrimi için termoeconomik sonuçlar	116
Çizelge 9.5 Model 3 ve mevcut gaz çevrimi için termodinamik sonuçlar	118
Çizelge 9.6 Model 3 ve mevcut gaz çevrimi için termoeconomik sonuçlar	119
Çizelge 10.1 Tasarlanan modellerin karşılaştırmalı termodinamik, termoeconomik ve ekonomik değerleri	122

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 6.1 Afyon Enerji – Gübre Santrali	50
Resim 6.2 Lagün	50
Resim 6.3 Gaz motorları	51
Resim 6.4 Gübre işleme	51
Resim 6.5 Hammadde kabulü	52



1. GİRİŞ

1.1 Motivasyon

Bir ülkenin kalkınması ve ekonomik olarak istikrar sağlaması sanayi ve teknolojinin gelişmesiyle paraleldir. Sanayi ve teknolojinin gelişimi için enerji ve enerjinin maliyeti önem taşımaktadır. Günümüzde enerji temininde kullanılan kaynakların sebep olduğu çevresel sorunlar gelecek için kaygıları artırmakta, dolayısıyla enerji tasarrufu ve çevre bilinci dünya çapındaki en önemli konulardan birine dönüşmektedir. Çünkü öncelikli olarak kullanılan kaynaklar petrol, doğalgaz ve kömür gibi yenilenemeyen ve çevreye zarar veren kaynaklardır (Canan 2021, Castelli vd. 2019, Aghei ve Saray 2021, Coşkun ve Al – Talabani 2017). Çevresel etkileri biliniyor olmasına rağmen petrol yakıtlarının 2030 yılına kadar baskın enerji kaynağı olarak kullanılacağı tahmin edilmektedir. British Petroleum'un hazırladığı 2016 yılı raporunda yeni fosil rezervleri keşfedilmez ve yıllık rezerv tüketimi sabit kabul edilirse doğal gaz 52 yıl, petrol 50 yıl ve kömür 114 yıl sonra bitecektir (Uysal vd. 2017).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, genellikle bir ülkenin iklim değişikliğine katkısını ve fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltmak için olası bir çözüm olarak önerilmektedir (Ulusoy vd. 2017). Son yıllarda Avrupa Birliği'nin tüm üye devletlerinin enerji politikalarında yapılan değişiklikler, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji ihtiyacındaki payını artırmayı amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda enerji kaynaklarının kullanımı konusuna yasal düzenlemeler getirilmektedir (Tańczuk vd. 2019). Enerji Bilgi Yönetim İdaresi yenilenebilir enerjinin 2040 yılında dünyanın enerji ihtiyacındaki payının %16 olduğunu ön görmektedir (Aghei ve Saray 2021). Öte yandan, nüfusun artmasıyla hemen hemen her sektörde yapılan üretimde artmıştır. Bunun sonucu olarak organik ve inorganik atıklar meydana gelmektedir. Bu atıkların verimli şekilde değerlendirilmesi insan sağlığı, yenilenebilir enerji ve çevrenin korunması açısından oldukça mantıklıdır (Tunçel 2017). Örneğin, hayvan gübresi depolama alanlarında toprak altı kirliliği veya yer altı suyu kirliliği görülmektedir. Aynı zamanda yağışlar nedeniyle bu yerlerdeki kirlilik, yüzey suyu kütlesinin ötrofikasyonuna da sebep olmaktadır. Bu durumda hayvan gübresinin enerji üretiminde

kullanımı hem çevre hem enerji açısından faydalı olacaktır (Baltrėnas vd. 2019).

Biyokütle, güneş enerjisinin fotosentetik olarak yakalanmasıyla oluşan ve kimyasal enerji olarak depolanan modern bir enerji kaynağıdır. Biyokütleyi gelecek vaat eden bir enerji kaynağı haline getiren fosil yakıtların bahsedilen kısa ömrü, çevreye zararları ve küresel iklim değişikliğidir. Petrol, kömür ve doğal gazdan sonra küresel birincil enerjinin yaklaşık %14'ünü en büyük enerji kaynağı olan yenilenebilir enerji temin eder. Ayrıca biyokütle kaynakları yenilenebilir enerjinin %11.5'ten fazlasını oluşturmaktadır. Biyokütlenin yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilmesinin sebebi doğal karbon döngüsünün bir parçası olmasıdır. Yaygın olarak bulunması, sifıra yakın CO₂/SO₂ (karbon dioksit/kükürt dioksit) emisyonu ve diğer enerji kaynaklarına kıyasla düşük maliyeti nedeniyle son zamanlarda fosil yakıtlara alternatif olarak önemli bir ilgi görmektedir. Biyokütle üzerine güncel mevcut çalışmalar gazlaştırma ve yanma modellemeleri yönündedir. Çünkü genel olarak biyokütle kullanarak güç üretmenin verimi düşüktür. Örneğin, küçük ve büyük sistemlerde ortalama verim sırasıyla yaklaşık %15 ve %30'dur. Gaz türbinlerinde biyokütle kullanımının da kendine has sorunları vardır. Gaz türbini, son derece temiz gaz gerektiren hassas bir cihazdır. Bu nedenle yakıt enjektörünün ve hattın tıkanmasını ve türbin kanatlarının hasar almasını önlemek için pahalı filtreler gerekir. Ayrıca, gaz türbini yanma odasında kullanılmak üzere makul bir ısıtma ile gazlaştırılarak üretilen sentez gazı, yanma işlemi için büyük miktarlarda hava gerektirir ve bu da kompresörü dalgalanmaya maruz bırakabilir. Yukarıda bahsedilen problemler, biyokütlenin harici yanmasıyla ve yüksek sıcaklıklı bir ısı eşanjörü kullanılarak çözülebilir (Gunaseelan 1997, Khoshgoftar Manesh vd. 2020, Khanmohammadi vd. 2015, Salehi vd. 2019).

Biyogaz enerjisi kullanımı ve üretimi gelişen değerli ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Çiftlik atıkları, tarımsal atıklar, atık sular gibi organik maddelerin anaerobik çürütülmesiyle metan yönünden zengin ve yanıcı biyogaz elde edilir. Biyogazın çevre üzerindeki etkisi fosil yakıtlardan daha azdır ve bu durum biyogazı temiz bir yakıt haline getirir. Anaerobik çürütme, metanojenik mikroorganizmaların biyogazın ana bileşeni olan metanı üretmek için organik madde, karbon dioksit ve hidrojen kullandığı; yenilenebilir enerjinin üretildiği ve sera gazı emisyonlarının, organik kirleticilerin,

patojenlerin ve kötü kokuların azaltıldığı mikrobiyal bir süreçtir. Süreç oksijensiz ortamda gerçekleşir. Çürütme ürünü ise tarımda gübre olarak kullanılmaktadır. Ne var ki, tavuk gübresi gibi yüksek nitrojen içeriğine sahip biyokütlelerin anaerobik çürütme verimleri düşüktür. Mikrobiyal çürüme esnasında nitrojen, amonyağa dönüşür. Yüksek konsantrasyonlarda amonyak mikrobiyolojik dönüşüm üzerinde güçlü bir inhibitör etki gösterir. Ayrışmamış serbest amonyak toksikliğe sebep olur. Hücrelere yayılarak ya proton dengesizliğine neden olur ya da mikroorganizmaların metabolik enzimlerine etki eder. Bu noktada nitrojen zengini biyokütlelerin verimli anaerobik çürütülmelerinin yolu amonyak engelinin aşılmasıdır. Özellikle kanatlı hayvan gübresinin anaerobik sindiriminde, substratın C/N (karbon/nitrojen) oranı optimal aralığı 20:1–30:1'dir. Biyogazın ana bileşeni olan metan, değerli bir yenilenebilir enerji kaynağı olmakla birlikte, atmosfere salınması halinde zararlı bir sera gazıdır. Metan, gaz motorları ve gaz türbinlerinde enerji üretmek için uygun bir yakıttır. Biyogazın kompozisyonu biyokütlenin türüne ve üretim yöntemine göre değişmekle birlikte genellikle %50 – 70 CH₄ (metan), %30 – 40 CO₂, %5 – 10 H₂ (hidrojen), %1 – 2 N₂ (nitrojen) ve eser miktarda H₂O (su) ve H₂S'ten (hidrojen sülfür) oluşur. Metan gazı dışındaki tüm bileşenler biyogaz kirleticisi olarak kabul edilir. Biyogazda CO₂ ve N₂ bileşenleri arttığında sistemin enerji ve ekserji verimleri üzerinde son derece etkili olan alt ısı değer azalmaktadır. Sıvılaştırılması için yüksek maliyet ve basınca ihtiyaç olduğundan gaz halde kullanılır. Geleneksel anaerobik çürütme mezofilik sıcaklıklarda (35 – 37 °C) gerçekleştirilir. Termofilik sıcaklıkların patojen ve yabancı ot tohumlarını daha çok imha ederek daha hızlı reaksiyon ve yüksek gaz üretimi sağlaması dikkate değer olsa da çevresel değişikliklere daha duyarlıdır (UluKardeşler ve Atalay 2018, Sevinchan vd. 2019, Ulusoy vd. 2017, Ergür ve Okumuş 2010, Skorek – Osikowska vd. 2020, Fuchs vd. 2018, Yılmaz 2019, Baltrėnas vd. 2019).

1.2 Tezin Amaçları

Bu tezin amaçları şu şekilde sıralanabilir:

- Afyon Enerji ve Gübre Santralinin termodinamik performansını ve maliyetlerini optimize etmek.
- Santralin ürettiği egzoz gazından faydalanmak amacıyla çeşitli modeller sunmak.

- Çevre kirliliğini azaltmak ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanımını desteklemektir.

Bu amaçların gerçekleşmesi halinde santral optimum operasyonel şartlarda düşük maliyet ve yüksek termodinamik performansla daha çevre dostu bir şekilde çalışabilir. Modellerin oluşturulması, simüle edilmesi ve optimizasyonun gerçekleştirilmesinde EES ve Aspen Plus yazılımları kullanılmıştır.

Termodinamik analiz ve optimizasyon metodolojisi, termodinamik performans üzerindeki önemli etkisi olan parametrelerin uygulanabilir sınırlar içerisinde optimize edilerek termodinamik performansın maksimize edilmesi ve termodinamik yasalara dayanarak ölçülmesi ilkesine dayanır. Bunun için santralin birinci ve ikinci yasaya dayalı bir enerji ve ekserji analizini yapmak gerekir. Bu sayede santralin güç kapasitesi, egzoz gazından faydalanabileceğimiz üst limit, bileşen seviyesinde ve tüm santralde meydana gelen ekserjetik yıkımlar ve bileşenlerin ekserjetik verimleri termodinamik performansı artırmak ve maliyetleri düşürmek için birer basamak haline gelir.

Diğer bir önemli analiz ise termoekonomik analizdir. İsminden de anlaşılacağı gibi termodinamik ve ekonomik tabanlı analizlerin birleşimidir. Eksergoekonomi olarakta bilinen analiz çeşitli ekonomik datalar ile termodinamik analizden elde edilen ekserjetik dataları bir araya getirir ve santralde açığa çıkan her birim ekserjiye bir maliyet atar. Bu yöntemde ise optimizasyonun amacı santralin ürün maliyetlerini azaltmak amacıyla termodinamik parametrelerin optimize edilmesidir.

1.3 Tezin Ana Teması ve Yaklaşımı

Bu tezde, atık egzoz gazından faydalanmak için Afyon Enerji ve Gübre Santraline entegre edilebilecek üç model geliştirilmiştir. Egzoz gazının yüksek enerjisini çeşitli amaçlarla kullanarak hem çevreye az zararlı egzoz gazı salmak hem de enerji verimini artırmak mevcut santrali iyileştirecek mantıklı seçimlerdir. Bu amaçlarla modellerin termodinamik ve termoekonomik analizi, ayrıca optimizasyonu yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. İlk model, tavuk gübresinden üretilen biyogazı yanmada kullanır ve

santrale entegre ORC ünitesi ile bir kojenerere (veya CHP (combined heat and power)) sistemi temsil etmektedir. Modelde atık ısı kullanılarak ekstra elektrik üretilir. Model ucuz elektrik üretimi için uygundur. İkinci model, tavuk gübresinden üretilen biyogazı yanmada kullanır ve santrale entegre birer ısıtma – soğutma ünitesi ile soğutma, ısıtma ve güç (CCHP (combined cooling, heating and power)) sistemini temsil etmektedir. Modelde atık ısı kullanılarak ısıtma ve soğutma üretilir. Model elektrik üretiminin yanında ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarının karşılanması için uygundur. Üçüncü model ise tavuk gübresinden biyogazı yanmada kullanır. Bir gaz çevrimi, gaz çevrimine entegre ORC ünitesi ve burada üretilen elektriği suyun elektrolizinde kullanan bir elektroliz ünitesi Model 3'ü temsil etmektedir. Model ihtiyaç fazlası elektrik enerjisinin depolanması için uygundur. Yaklaşımın ilk adımı bu modellerin EES ve Aspen Plus yazılımlarında modellenmesidir. İkinci adım ise bu modellerin termodinamik ve termoekonomik açıdan optimizasyonudur.

1.4 Genel Tez İçeriği

Tezin birinci bölümü giriş bölümüdür. Bu bölümde çalışmanın teması, amacı, içeriği ve literatür araştırmaları detaylı olarak sunulmuştur. Ayrıca tavuk gübresinden üretilen biyogazın biyogaz santrallerinde kullanımını üzerine tezin ilk adımıdır.

İkinci bölüm, biyokütleyi ve Türkiye’de ki biyokütle potansiyelini sunmaktadır. Tarım ve hayvancılık ülkesi olan ve geniş ormanlık alanlara sahip 84 milyon nüfuslu Türkiye biyokütlece zengin bir ülkedir. Dolayısıyla hayvancılığın ve tarımın yapıldığı yerler ile nüfusun yoğun olduğu yerlerin belirlenmesi biyogaz santralleri için bir fizibilite çalışmasıdır. Bu bölüm Türkiye’de tarımdan, hayvancılıktan, ormanlardan ve kentlerden elde edilen atıkların, enerjik karşılıklarının ve lisanslı – lisanssız şekilde faaliyet gösteren biyogaz santralinin dağılımı hakkında bilgi sunmaktadır.

Üçüncü bölüm termodinamik analiz için gereken metodolojiyi sunmaktadır. Analiz enerji ve ekserji analizi olmak üzere temel olarak iki basamaktan oluşmaktadır. Termodinamik performans bu bölümde analiz edilmiştir. Ayrıca analizde yapılan termodinamik kabuller bu bölümde sunulmuştur.

Dördüncü bölüm termoekonomik analiz için gereken metodolojiyi sunmaktadır. Bu bölümde öncelikle ekonomik analiz daha sonra termoekonomik analiz sunulmuştur. Üçüncü bölümde elde edilen ekserjetik veriler bu bölümde de kullanılmıştır. Termoekonomik kabuller de bu bölümde sunulmuştur.

Beşinci bölüm optimizasyon metodolojisini sunmaktadır. Tezde termodinamik ve termoekonomik olmak üzere iki optimizasyon için EES yazılımında kullanılacak yöntemlerden detaylı şekilde bahsedilmiştir.

Altıncı bölüm Afyon Enerji – Gübre Santrali ve tasarlanan modellerin detaylı tanıtımını sunmaktadır. Bölüm öncelikle mevcut santralin bölümleri ve iş akışı hakkında bilgi vermektedir. Daha sonra tasarlanan modellerin şematik görünümünü, iş akışlarını, ekipmanları, ekipmanların toplam maliyetlerini ve ekipmanlarda kullanılan termodinamik ve termoekonomik analiz denklemlerini içermektedir.

Yedinci bölüm her bir model için mevcut gaz çevrimi ve modellerin termodinamik analiz sonuçlarını sunmaktadır. Termodinamik analizden elde edilen enerji ve ekserji verimleri, ekserjetik yıkımlar, kararlı durum değerleri, ekserji akışları gibi önemli sayısal sonuçlar verilmektedir. Ayrıca Aspen Plus yazılımında tasarlanan her bir modelin şematik görünümü de bu bölümde sunulmaktadır.

Sekizinci bölüm her bir model için mevcut gaz çevrimi ve modellerin termoekonomik analiz sonuçlarını sunmaktadır. Bölümde termoekonomik analizden elde edilen ekipman maliyet oranları, ekserjetik maliyetleri ve birim ekserji maliyetleri gibi önemli sayısal sonuçlar verilmiştir.

Dokuzuncu bölüm her bir model için yapılan optimizasyon çalışmalarının detaylarını sunmaktadır. Bölümde öncelikle EES'nin optimizasyon mantığından bahsedilmiştir. Daha sonra optimize edilen değişkenlerin amaç fonksiyonu üzerindeki etkileri ve mevcut gaz çevrimi ile tasarlanan modellerin karşılaştırmalı termodinamik ve termoekonomik performansları verilmiştir.

Onuncu bölümde ise tez çalışmasının genel sonuçları ve tartışması sunulmaktadır. Bu bölümde tasarlanan her bir model için birçok önemli sayısal sonuç bir çizelgede verilmiş ve yorumlanmıştır. Daha sonra biyogaz santrallerinin iyileştirilmesi konusunda önerilerde sunulmuştur. Son olarak tezin validasyonu verilmiştir.

1.5 Literatür Araştırması

Biyogaz beslemeli güç santrallerinin verimlerini artırmak, emisyonları ve maliyetleri azaltmak ve elektrik üretimi, ısıtma, soğutma, hidrojen üretimi gibi güncel konular için yapılan literatürdeki araştırmalar bu bölümde sunulmuştur.

Gholizadeh vd. (2019), %60 metan – %40 karbondioksit içeren biyogazla beslenen bir gaz türbini çevrimine entegre edilmiş bir ORC'nin fizibilitesini gerçekleştirmişlerdir. Önerilen CHP sistem, %41.83 enerji verimi, %38.91 ekserji verimi ve 17.2 \$/GJ toplam ürün maliyetiyle 1368 kW net elektrik gücü üretmektedir (Gholizadeh vd. 2019).

Gargari vd. (2019), biyogazla beslenen bir trijenerasyon sistemi modeli önermişlerdir. Multijenerasyon sistemi sırasıyla 123.59 MW ısıtma kapasitesi, 0.73 MW optimum soğutma kapasitesi, 280.35 MW net güç, 18.14 kg/h distile su ve 0.2432 kg/h hidrojen üretebilmektedir. Bu durumda sistemin enerji verimi, ekserji verimi, birim ürün maliyeti ve çevresel ceza maliyet oranı sırasıyla %72.75, %50.21, 6.79 \$/GJ ve 168 \$/h olarak hesaplanmıştır (Gargari vd. 2019).

Benato ve Macor (2017), biyogazla çalışan 1 MW'lık bir motordan maksimum net elektrik gücü elde etmek için en uygun ORC tasarımını analiz etmişlerdir. Analizler, bir yıl boyunca 115 farklı ORC sıvısı ile gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre toluen, benzenden daha iyi bir performans sergilemiştir. Ancak gerçek verilerle tasarlanan bir reküperatif ORC'nin %30 daha fazla net elektrik enerjisi üreteceği gözlemlenmiştir (Benato ve Macor 2017).

Hosseini vd. (2016), net çıkış gücü 1.4 MW olan bir santralin enerji ve ekserji değerlerini etkileyen parametrelerin performans üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Termodinamik analiz sonuçlarına göre gaz türbini izentropik verimi arttıkça gaz türbini

çıkış sıcaklığı düşmüş ve hava ön ısıtıcısının ve ısı eşanjörünün performansı olumsuz etkilenmiş; ancak tüm sistemin enerji ve ekserji verimi artmıştır. Hava kompresörü basınç oranı arttıkça kombine çevrimin enerjisi ve ekserjisi azalmıştır. Eşanjördeki ekserji yıkımının azalmasıyla ve ORC türbininin giriş basıncının artmasıyla kombine çevrimin hem birinci hem de ikinci yasa verimi artmıştır. Artan ORC türbin giriş basıncı ile ORC'de güç üretimi artarken, genel çevrimin ekserji yıkımı kısmen azalmıştır (Hosseini vd. 2016).

Sevinchan vd. (2019), biyogaz beslemeli multijenerasyon santralin enerji ve ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Santralden, 300 ev için elektrik, beş sera için ısıtma gücü, soğutma gücü ve baca gazından ürün suyu üretmeyi hedeflemişlerdir. Multijenerasyon sistemi, fermenterler, açık Brayton Çevrimi, ORC, tek etkili soğutucu gibi alt sistemlerden oluşmaktadır. Analiz sonuçlarına göre 1078 kW elektrik, 198 kW ısıtma, 87.54 kW soğutma gücü ve 40 kg günlük su üretimi elde edilmiştir. Ayrıca yanma odasında ki %65'lik ekserji yıkımı ile maksimum %30.44 ekserji verimi elde edilmiştir (Sevinchan vd. 2019).

Koç vd. (2019), doğal gazla çalışan gaz türbinli bir kojenerasyon çevriminin enerji ve ekserji verimini analiz etmiş ve değerleri pratik değerlerle karşılaştırmıştır. Analiz sonuçlarına göre, gaz türbininin maksimum enerji ve ekserji verimi pratikte %35.45 ve %50.5 olarak elde edilirken, teoride sırasıyla %43.82 ve %60.7 olarak elde edilmiştir. Kojenerasyon sisteminin maksimum enerji ve ekserji verimi sırasıyla %79 ve %94.19, teoride ise %83.92 ve % 91.64 olmuştur (Koç vd. 2019).

Doseva ve Chakyrova (2015), biyogaz beslemeli içten yanmalı motorlarla güç üreten bir enerji santralinin enerji ve ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre, santralin enerji ve ekserji verimi sırasıyla %53.347 ve %34.636 olarak elde edilmiştir. Ayrıca en yüksek ekserji yıkımı biyogaz motorlarında meydana gelmiştir (Doseva ve Chakyrova 2015).

Jarrar vd. (2020), beş çiftlikteki inek sayısına dayalı olarak bir biyogaz santralinin ekonomik fizibilitesini analiz etmişlerdir. Araştırmada 100, 500, 1000, 1500 ve 2000

inekten oluşan 5 çiftliğin iç verimleri sırasıyla %11, %12, %13, %16 ve %17 olarak elde edilmiştir. Ayrıca bu 5 çiftlik için elektrik maliyet değerleri sırasıyla 0.071, 0.069, 0.064, 0.055 ve 0.055 \$/kWh değere karşılık gelmektedir (Jarrar vd. 2020).

Barzegaravval vd. (2018), yakıttaki metan içeriği yüzdesini değiştirerek yakıt fiyatlandırması için biri ekserjiye diğeri biyogazın alt ısıl değerine dayalı olmak üzere iki tanım kullanmışlar ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Sonuçlara göre ekserjiye dayalı yakıt fiyatlandırmasının daha gerçekçi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca metan oranı %95'ten %60'a düşürüldüğünde toplam maliyet oranı %1 artmıştır. Bununla birlikte ekserji verimi azalmış ve üretilen elektriğin birim maliyeti 0.05 \$/kWh – 0.18 \$/kWh arasında değişmiştir (Barzegaravval vd. 2018).

Mehr vd. (2015), SOFC'nin (katı oksit yakıt pili) farklı konfigürasyonları için biyogaz kullanmışlar ve performanslarını termodinamik ve termoeconomik olarak karşılaştırmışlardır. Sonuçlara göre anot geri dönüşüm oranının artırılması veya katot geri dönüşüm oranının azaltılması sistemin birim ürün maliyetini artırmıştır. Ayrıca anot ve katot geri dönüşümü ile biyogaz bazlı yakıt pilinin termodinamik ve termoeconomik açıdan doğal gaz bazlı olandan daha üstün olduğu görülmüştür (Mehr vd. 2015).

Ghaebi vd. (2019), bir biyogaz santraline ORC ünitesi entegre ederek egzoz gazından faydalanmayı amaçlamış ve sisteminin termodinamik değerlendirmesini ve optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Hem çevresel hem de termodinamik açıdan üstün özellikleri nedeniyle ORC için en uygun seçim olarak R600'ü önermişlerdir. Bu sayede santral sırasıyla %45.63 ve %74.89 termal ve ekserji verimi ile 15.9 kW elektrik ve 0.02529 kg/s hidrojen üretmiştir (Ghaebi vd. 2019).

Rostanzadeh vd. (2018), temiz bir enerji kaynağı sağlamak amacıyla hibrit biyogaz – jeotermal ısı kaynağı kullanmışlar ve çok aşamalı bir sistemin bir termodinamik modellemesini gerçekleştirmişlerdir. Bu modellemede sırasıyla %62.28 enerji ve %74.9 ekserji verimi elde etmişlerdir (Rostanzadeh vd. 2018).

Abuşoğlu vd. (2013), GASKİ biyogaz beslemeli gaz motorlu kojenerasyon sisteminin

termodinamik ve termoekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Kojenerasyon sisteminin ekserji verimi %26.6, üretilen elektriğin ekserjetik maliyet oranı ve birim ekserji maliyeti sırasıyla 90 \$/h (159.3 ₺/h) ve 25 \$/GJ (44.25 ₺/GJ) olarak hesaplanmıştır (Abuşoğlu vd. 2013).

Yinanç (2017), Kayseri kentsel katı atık düzenli depolama sahası biyogaz elektrik santralinden elde edilen atık ısıdan dört farklı ORC ünitesi tasarlayarak elektrik üretmişlerdir. Enerji ve ekserji analizlerinde ORC için R245fa, R600, R123, R124 olmak üzere dört farklı çalışma akışkanı kullanılmıştır. En yüksek enerji ve ekserji verimi R600 akışkanının kullanımı ile sırasıyla %13.8 ve %55 olarak elde edilmiştir (Yinanç 2017).

Leonzio (2018), biyogaz beslemeli bir CCHP sistem için ChemCad 6.3® yazılımı ile sistemin tasarımı ve simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Santral, 3280 kW biyogazın yanmasıyla 925 kW elektrik enerjisi, 2523 kW termal enerji ve 473 kW soğutma enerjisi üretmektedir. Ayrıca önerilen trijenerasyon sisteminin bir kojenerasyon sistemine kıyasla %28 daha fazla elektrik ve %40 daha düşük karbondioksit emisyonu ürettiği görülmüştür (Leonzio 2018).

Su vd. (2018), fosil yakıt enerji tüketimini kolaylaştırmak ve biyogaz kullanımının verimi artırmak için sentetik biyogaz ve güneş enerjisi kullanımına sahip bir CCHP sistemi sunmuşlardır. Analiz sonuçları, biyogaz ve güneş enerjisinin sentetik kullanımının referans sistemlere göre yıllık elektrik üretimini %8.7, soğutmada kullanılan enerjiyi %2.57, doğal gaz tüketimini %8.66 ve CO₂ ayak izini %8.2 azalttığını göstermiştir (Su vd. 2018).

Parikhani vd. (2020), Kalina çevriminin değiştirilmiş bir versiyonu olan düşük sıcaklıklı bir ısı kaynağı tarafından tahrik edilen CCHP sistemini termodinamik ve termoekonomik açıdan incelemişlerdir. Analiz sonucunda %49.83 enerji verimi, %27.68 ekserji verimi ve 198.3 \$/GJ toplam birim ürün maliyeti elde etmişlerdir (Parikhani vd. 2020).

Peng vd. (2020), SOFC'li bir CCHP sistem modeli önermiş ve yakıt ve oksidan akış

hızlarının performans üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Modeldeki en yüksek SOFC verimi 89 kg mol/h yakıt ve 1100 oksidan akış hızları ile %38.57 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, SOFC tarafından üretilen en yüksek güç, sırasıyla 93 mol/h yakıt ve 1140 kg oksidan akış oranları ile 7864.6 kW'tır (Peng vd. 2020).

Wegener vd. (2021), odunsu biyokütle türlerinin gazlaştırılmasına dayalı küçük ölçekli bir CCHP sistemi için dinamik bir model önermişlerdir. Model ayrıca biyokütlenin kimyasal bileşiminin ve ortam sıcaklıklarının bileşenlerin ekserji performansı üzerindeki etkilerini de hesaba katmıştır. Analiz sonuçları, küçük ölçekli CCHP sistemlerinin büyük ölçekli CCHP sistemlerinden daha yüksek ekserji verimlerinde çalıştığını göstermiştir (Wegener vd. 2021).

Wei vd. (2021), yakıt hücreli bir CCHP sisteminin yıllık maliyetini en aza indirmek ve ekonomik verimi en üst düzeye çıkarmak için optimize edilmiş bir model önermişlerdir. Optimizasyon sonucunda %55.76 ekserji verimi ve 24800 \$ yıllık maliyet ile sera gazında yıllık 4480 kg azalma elde edilmiştir (Wei vd. 2021).

Ghamari vd. (2021), bir otelin ısıtma, soğutma, elektrik ve tatlı su ihtiyaçlarını karşılamak için bir CCHP sistemi tasarlamışlardır. Dizel motor ve gaz türbini olmak üzere iki ekipmanın, ısı ve güç üretiminin yıllık maliyeti üzerindeki etkilerini incelediler. Analiz sonucunda türbin dizel motoruna göre göre yüksek performans göstermiştir (Ghamari vd. 2021).

Aghaei ve Saray (2021), bir süt fabrikası için bir CCHP sistemi önermiş ve optimize etmişlerdir. Önerilen sistem %20 elektrik verimine ve 1.2'den yüksek bir COP'ye (performans katsayısına) sahiptir. Optimizasyon sonucunda CCHP sisteminin yakıt enerjisi tasarruf oranı ve CO₂ emisyon azaltma oranı yaklaşık %45, yıllık toplam maliyet tasarruf oranı ise %37 olmuştur (Aghaei ve Saray 2021).

Ai vd. (2022), bir ST (solar termal girdi) sistemi ile bir rejeneratif OFC (organik flaş çevrimi) sistemini birleştiren bir CCHP – ST – OFC sistemi tasarlamış ve bunu geleneksel CCHP ve CCHP – ST – ORC sistemi ile termodinamik olarak

karşılaştırmışlardır. Analiz sonuçları, CCHP – ST – OFC sisteminin CCHP – ST – ORC sistemine göre sırasıyla 4.7 kW ve 19.3 kW daha fazla elektrik ve ısı kaynağı sağladığını göstermiştir. Ayrıca CCHP – ST – OFC sisteminin enerji ve ekserji veriminin sırasıyla %53.1 ve %38.7 olduğu ve CCHP – ST – ORC sistemine göre doğalgaz tüketimini %9 azalttığı görülmüştür (Ai vd. 2022).

Long vd. (2021), biyogazın kullanıldığı bir hidrojen üretimi ve CO₂ giderimi için bir ara soğutucu olarak iyonik sıvı [Bmim][PF₆]'yı Aspen Plus'ta test etmişlerdir. Test sonucunda, CO₂ absorpsiyonu için sulu amin çözeltilerinin replasmanı için [Bmim][PF₆]'nın kullanımı ile %99.5 saflıkta %96 biyometan geri kazanımı sağlandığı, ısı ve güç entegrasyonunda performansı artırarak hidrojen üretiminin iyileştiği ve katı karbon üretiminin arttığı görülmüştür (Long vd. 2021).

Hosseini (2020), katı oksit buhar elektrolizöründe buhar üreten bir kazan ile biyogaz yakıtlı (%60 CH₄ + %40 CO₂) bir gaz türbinli güç üretim sistemi tasarlamış ve performans analizini yapmışlardır. Analiz sonucunda, CH₄ oranının %80'e çıkarılmasıyla üretilen elektrik gücü ve hidrojen üretimi sırasıyla %24 ve %20 artmış, kazandaki buhar sıcaklığını 850 K'den 1450 K'ye artırmak için yakıt tüketiminin %1 artırılmasıyla hidrojen üretimi 0.01 mol/s'den 0.052 mol/s'ye yükselmiştir (Hosseini 2020).

Sukpancharoena ve Phetyim (2021), hidrojen ve elektrik üretimine dayalı biyogaz beslemeli bir modelin Aspen Plus'ta optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Optimizasyon sonucunda 100 kmol/h biyogaz kullanımı ile sırasıyla %34.86 ve %5.62 artış ile 211.46 kmol/h hidrojen ve 2311.68 kWh elektrik gücü üretilmiştir (Sukpancharoena ve Phetyim 2021).

Tozlu (2022), biyogazdan yakalanan CO₂'nin hidrojenasyonu kullanarak metanol üretiminin termodinamik ve termoeconomik analizini yapmıştır. Metanolün hidrojen ihtiyacını solar fotovoltaik modüllerle çalıştırılan proton değişimli membran elektrolizöründen karşılamıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre günlük metanol üretimi 1674 kg iken elektrik, hidrojen ve metanol üretim maliyetleri sırasıyla 0.043 \$/kWh,

3.156 \$/kg ve 0.693 \$/kg olarak hesaplanmıştır (Tozlu 2022).

Phan vd. (2022), Fransa'da biyogazdan hidrojen üretiminin endüstriyel dağıtımını hedefleyen VABHYOGAZ (biyogazın hidrojene değerlendirilmesi) programı dahilinde, yoğun enerji gerektiren metanın buhar, kuru ve tri reformasyonunun optimizasyonunu Aspen Plus'ta gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlara göre %30 atık gaz geri dönüşümü ve metan tri reformasyonu tekniği ile hidrojen üretimi, en yüksek hidrojen üretimi ve enerji verimini sağlamıştır (Phan vd. 2022).

Park vd. (2020), gıda atıklarından etkin hidrojen üretimi için anaerobik çürütme ve biyogaz reformasyonu koşullarını araştırmış ve optimize etmişlerdir. Optimizasyonda hidrofoil karıştırıcı ve kübik şekilli reaktörlerin aksel akış ve türbülans nedeniyle yüksek performans sergilediği görülmüştür. 60 günlük reaktör stabilite testi ve optimizasyon sonucunda 700 °C reaksiyon sıcaklığı ve 1 H₂O/CH₄ oranı ile 1 kg gıda atığından 84 L biyogaz elde etmişlerdir. Ayrıca 25 saat boyunca ciddi bir deaktivasyon ve dalgalanma olmaksızın biyogazdan biyogazın buhar reformasyonu tekniği ile hidrojen üretilebileceği görülmüştür (Park vd. 2020).

Minutillo vd. (2020), biyogaz kullanan iki hidrojen üretim santralini, hem santral hem de bileşen seviyesinde enerji ve ekserji analizi yaparak incelemiş ve karşılaştırmışlardır. Santrallerden biri buhar reformasyonu yoluyla biyogazdan hidrojen üretirken diğeri ototermal reformasyon yoluyla üretmektedir. Çalışmanın sonucunda, buhar reformasyonu ile hidrojen üreten santral %59.8 enerji ve %59.4 ekserji verimi ile diğer santralden daha iyi performans göstermiştir. Bununla birlikte buhar reformasyonu yoluyla hidrojen üreten santralde ısı ve hidrojen üretimine bakıldığında %73.5 enerji ve %64.4 ekserji verimi elde edilmiştir (Minutillo vd. 2020).

Kim vd. (2022), elektrolizden üretilen oksijenin hem iyi bir ısı kaynağı olarak hem de ototermal reformasyon sürecinde kullanmak amacıyla sıkıştırılmış gaz ve sıvı oksijen depolama olmak üzere iki prosesi hidrojen üretimine entegre ederek hidrojen maliyetini optimize etmişlerdir. Optimizasyon sonucunda hidrojen maliyetinin ortalaması ve varyansı sırasıyla %11.9 ve %37.8 oranında azalmıştır. Ayrıca yenilenebilir enerji ve

biyogaz fiyatının sırasıyla 0.06 \$/kWh ve 5.58 \$/MMBTU olması halinde 55 MW'ın üzerindeki bir güç ölçeğinde hidrojen maliyetinin piyasa fiyatının altında olduğu görülmüştür (Kim vd. 2022).

Lin ve Wu (2020), biyogazın buhar reformasyonu ile buhar ve sulu üre çözeltisi kullanarak hidrojen açısından zengin sentez gazı üretimini ve karbondioksiti çeşitli metan konsantrasyonlarıyla termodinamik analizde karşılaştırmışlardır. Sonuçlara göre buhar yerine sulu üre çözeltisinin kullanımı ile H₂ ve CO üretimi artmıştır. 700 °C'de 2 den yüksek buhar/biyogaz oranları için CO₂ oluşmazken, 800 °C'den yüksek sıcaklıklarda CO₂ oluşumu hafif şekilde artmıştır (Lin ve We 2020).

Madeira vd. (2021), domuz gübresi biyogazından hidrojen üretiminin potansiyelini değerlendirmişlerdir. Değerlendirme için ekolojik, ekserjetik ve ekonomik verim baz alınmıştır. Değerlendirme sonucunda ekolojik verim %93.73, kirlilik göstergesi %19.15 ve enerji verimi %79.06 olarak hesaplanmıştır. Bu da 8760 saat/yıl üretim süresince %76'lık bir enerji verimi, 0.14 \$/kWh hidrojen üretim maliyeti ve 8 yıl geri ödeme anlamına gelmektedir (Madeira vd. 2021).

Hajizadeh vd. (2022), psikrofilik anaerobik çürütme ve kuru metan reformasyonunu entegre ederek biyokütleden hidrojen üretimini değerlendirmek amacıyla bir model geliştirmişlerdir. Modelde toplam katı içeriği, organik yükleme oranı, hidrolik tutma süresi ve çürütme ürünü devridaim fraksiyonunun biyogaz ve metan verimi üzerindeki etkileri araştırılmış ve en yüksek metandan hidrojene dönüşüm ve en düşük enerji tüketimi amaçlanmıştır. Sonuçlara göre 48.07 kg/h debili biyogaz ile 8.11 kg/h hidrojen üretilirken, 45.5 kg/h hidrojen üretim kapasitesinin maliyeti 1.39 \$/kg olmuştur (Hajizadeh vd. 2022).

Wang vd. (2022), kimyasal çevrimli hidrojen üretimi teknolojisiyle düşük karbonlu hidrojen üretimi ve biyoenerji entegrasyonuna dayalı bir çalışma yapmışlardır. Termogravimetrik analizör sonuçlarına göre sıcaklığın 950 °C olması halinde CO₂ en etkili şekilde sınırlandırılmış ve CO/H₂ oranı minimuma indirilmiştir. Ancak en yüksek hidrojen saflığı oksijen taşıyıcısının gramı başına 241.9 mL üretilabilirlik ve %98.29

saflıkla 875 °C’de elde edilmiştir (Wang vd. 2022).

Bu çalışmada, Afyon’da bulunan ve tavuk gübresinden biyogaz ile çalışan 4000 kW net elektrik gücüne sahip bir biyogaz güç santralının termodinamik ve termoekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler öncelikle termodinamik ve termoekonomik kodlama ile EES yazılımında yapılmıştır. Daha sonra modeller biyogaz santralleri konusunda en iyi bilinen Aspen Plus yazılımına aktarılmış ve modellerin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Santraldeki gaz çevrimi rejeneratörlü Brayton çevrimine göre çalışmaktadır. Egzoz gazı atık enerjisini kullanarak santral performansını artırmak, maliyetleri düşürmek ve elektrik üretimi, ısıtma, soğutma ve hidrojen üretimi yapmak amacıyla üç model önerilmiştir. Model 1 ve Model 2’de santral termoekonomik olarak optimize edilirken; Model 3’te termodinamik olarak optimize edilmiştir. Model 1, %60 metan – %40 karbon dioksit karışımı biyogaz ile çalışan gaz çevrimi ve bir ORC ünitesinden oluşmaktadır. Model 2, %60 metan – %40 karbon dioksit karışımı biyogaz ile çalışan gaz çevrimi ve birer ısıtma ve soğutma ünitesinden oluşmaktadır. Son olarak Model 3, saf metandan oluşan biyogaz ile çalışan gaz çevrimi, bir ORC ünitesi ve ORC’nin ürettiği elektriği suyun elektrolizi için kullanan bir elektroliz ünitesinden oluşmaktadır.

1.6 Tavuk Gübresinin Biyogaz Üretiminde Kullanılması

Kanatlı hayvancılık endüstrisinin neden olduğu çevre kirliliği, atıkların anaerobik sindirimi ile kontrol edilebilir. Tavuk gübresindeki organik madde biyolojik olarak parçalanabilir olduğundan, bu atıkların anaerobik sindirimi, metan üretimi ile atık miktarını en aza indirmek ve enerjiyi geri kazanmak için alternatif bir yöntem olarak düşünülebilir. Tavuk gübresinin ideal C:N:P (karbon:nitrojen:fosfor) içeriği 100:10:1 olmalıdır. Fakat tavuk gübresi gıda atığı, inek gübresi, çamur, domuz gübresi gibi birçok biyokütleden daha fazla nitrojen içeriğine sahiptir. Bu nedenle, tavuk gübresinin toprak gübresi olarak kullanılması nitrojen ve fosfor sızıntısının önlenmesine neden olacak ek bir karbon kaynağı gerektirir. Benzer şekilde tavuk gübresinden biyogaz üretimini iyileştirmek için gübrenin karbon açısından zengin bir substrat ile birlikte çürütülmesi gerekir. Anaerobik çürütme de eşçürütme (co – digestion) açısından tavuk

gübresi için uygun substratlar, lignoselülozik biyokütle gibi karbonca zengin biyokütledir. Tavuk gübresinin verimli bir şekilde biyogaza dönüşümü zordur. pH, sıcaklık, substrat türü, substratın toplam katı ve uçucu katı içeriği, hidrolik tutma süresi ve alıştırma süresi biyogaz üretim oranını ve inhibisyon oranını etkileyen faktörlerdir. Bununla birlikte tavuk gübresinin artırılması gereklidir. Aksi takdirde su kütlelerine sızan fosfor, yer altı sularına sızan nitrat, sera gazları ve patojenik mikropların salınımı büyük problemler haline gelir. Ayrıca gübredeki amonyak artışına bağlı olarak ortaya çıkan amonyak inhibisyonunu uzaklaştırmak için gereken teknikler ekonomik açıdan sınırlı uygulanabilirliği, gübrenin enerji üretimi için kullanımını sınırlar. Bu yüzden tavuk gübresinin yönetimi için en yaygın yöntem anaerobik çürütme ile biyogaz üretimidir. Bu şekilde biyogaz ısı ve elektrik üretimi için kullanılabilirken anaerobik bozunmadan sonra kalan organik madde daha sonra sürdürülebilir bir şekilde tarımsal gübre olarak kullanılır. Tavuk gübresi yüksek verimli bir biyogaz hammaddesi olarak kabul edilir. Bu nedenle tavuk gübresinin anaerobik çürütülmesi, bu tür atıkları işlemek ve aynı zamanda yenilenebilir enerji üretmek için öncelikli bir seçenektir. Anaerobik çürütme ise enerji tasarrufu, biyogübre üretimi ve sera gazı yönetimi açısından tavuk gübresi yönetimi için uygun bir teknolojidir. Hidroliz, asidojenez, asetojenez ve metanojenez olmak üzere 4 aşamadan oluşur. Biyogaz üretiminde amonyak – nitrojen ayrıştırılması ve metan oranını artırma üzerine literatürdeki bazı çalışmalar bu bölümde sunulmuştur (Dalkılıç ve Uğurlu 2015, Jurgutis vd. 2020, Zhao vd. 2022).

Dalkılıç ve Uğurlu (2015), mezofilik – termofilik olmak üzere iki aşamalı bir anaerobik sistemde farklı yükleme oranlarında tavuk gübresinden (1.9 gr VS/L.d – 4.7 gr VS/L.d aralığında ve toplam katı içeriği %3 – %8.25) biyogaz üretimini araştırmışlardır. Sisteme 2.2 gr VS/L.d (%2.3 VS – %3.8 toplam katı içeriği) ile besleme yapıldığında 554 mL/(gr.VS) biyogaz üretim oranı elde edilmiştir. Üretilen biyogazın metan içeriği ise %74 olarak belirlenmiştir (Dalkılıç ve Uğurlu 2015).

Li vd. (2017), bir eşçürütme sisteminin metan potansiyelini araştırmışlardır. Eşçürütme tavuk gübresinden mikroalge doğru 0:10, 2:8, 4:6, 6:4, 8:2 ve 10:0 oranlarında uçucu katıya göre gerçekleştirilmiştir. En yüksek metan üretimini ise 8:2 oranında 238.71 mL.(gr.VS)⁻¹ olarak belirlemişlerdir. Eşçürütme sistemi için biyokütleler mikroag

Chlorella 1067 ve tavuk gübresi iken ortak substrat olarak yosun biyokütlesini kullanmışlardır. Bu sayede toplam nitrojenin %91'ini ve çözünür organiklerin %86'sını geri dönüştürmüşlerdir (Li vd. 2017).

Jijia ve Siripatana (2017), pirinç – şehriye atık suyunun tavuk gübresi ile birlikte eşçürütülmesiyle biyometan potansiyelini değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda iyi atık dengesi, uygun başlangıç pH değeri ve uçucu yağ asidi/alkalilik oranının biyogaz üretim oranını ve metan oranını artırdığı görülmüştür (Jijia ve Siripatana 2017).

Fuchs vd. (2018), tavuk gübresinden biyogaz üretiminde amonyak inhibisyonunu azaltmak için Çin ve Avrupa'dan pratik yöntemler sunmuşlardır. Bu yöntemler arasında ayırıştırma, membran ekstraksiyonu, struvit çökeltme, biyolojik uzaklaştırma ve bazı iyi araştırılmamış yöntemler yer almıştır (Fuchs vd. 2018).

Shen vd. (2019), Asya'da bir tür meyve atığı olan Durian kabuğunun tavuk gübresi, mandıra gübresi ve domuz gübresi ile farklı oranlarda anaerobik eşçürütülmesini araştırmışlardır. Sonuçlara göre en yüksek kümülatif metan verimi ve biyolojik bozunma 1:1 oranında Durian kabuğu ve domuz gübresiyle sırasıyla 224.8 mL.(gr.VS)⁻¹ ve %48.3 olarak elde edilmiştir (Shen vd. 2019).

Yin vd. (2019), anaerobik çürütmenin hidroliz evresini hızlandırmak amacıyla tavuk gübresinin hipertermofilik (70 °C) ön işlemini 10, 5, 3, 2, ve 1 gün olmak üzere farklı hidrolik tutma sürelerinde araştırmışlardır. Amonyak – nitrojen ayırıştırma ve hidroliz performansını artırmak için ön arıtma reaktörüne yerinde gaz fazında amonyak ayırıştırma entegre etmişlerdir. Sonuçlara göre, yerinde gaz ayırıştırma işlemi amonyak – nitrojen'in %18 – %31'ini ayırştırmış ve hidrolizi %2.6 – %31.1 iyileştirmiştir. Ek olarak, 3 gün hidrolik tutma zamanında metan verimi maksimum 518 mL.(gr.VS)⁻¹'e ulaşmıştır (Yin vd. 2019).

Fakkaew ve Polprasert (2021), tavuk gübresi atık suyundan NH₃'ün (amonyak) ayırştırılması için bir ön arıtma prosesi olarak hava sıyırma kullanmışlardır. Farklı sıcaklıklarda, başlangıç pH değerlerinde, hava akış hızlarında ve ayırıştırma sürelerinde

deneyler yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre 11 başlangıç pH değerinde, 80 °C sıcaklıkta ve 4 L/dk hava akış oranında %80 amonyak ayrıştırılmıştır. Bununla birlikte ön arıtma prosesi biyogaz üretiminde yaklaşık %25 artış sağlamıştır (Fakkaew ve Polprasert 2021).

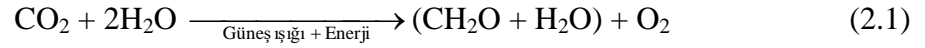
Hakimi vd. (2021), tavuk gübresi anaerobik eşçürütülmesini ve serai wangi, nane bitkisi ve portakal kabuğu atığı gibi katkı maddelerinin biyogaz üretimi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlara göre tek başına tavuk gübresinin çürütülmesiyle en yüksek biyogaz ve metan verimi sırasıyla 62.43 mL.(gr.VS)⁻¹ ve 31.12 mL.(gr.VS)⁻¹ olarak bulunmuştur. Portakal kabuğu atığı ve nane limonen (limon özü) içerdiklerinden anaerobik süreci engellerken, serai wangi'de bulunan yüksek lignin içeriği ise süreci yavaşlatmıştır. Dolayısıyla hiçbir katkı maddesinin tavuk gübresiyle eşçürütülmesini önermemişlerdir (Hakimi vd. 2021).

Chen vd. (2021), Fas'ın Rabat – Salè – Zemmour – Zaïr bölgesinde biyogaz üretimi için tavuk gübresinin enerji dengesini araştırmışlardır. Biyogaza dönüştürülen bir ton kuru tavuk gübresi ile 1350 MJ enerji kazanımı sağlamışlardır. Bununla birlikte, çürütme işlemi için tavuk gübresine buğday samanı eklendiğinde enerji kazancı 3996 MJ/ton kuru tavuk gübresine yükselmiştir (Chen vd. 2021).

Zhao vd. (2022), Enteromorpha ve yeşil atıktan biyometan üretiminde Enteromorpha ve yeşil atık çürütme sistemlerine tavuk gübresi ekleyerek metan oranını arttırmayı hedeflemişlerdir. Sonuç olarak tavuk gübresinin biyometan üretimine dahil edilmesiyle maksimum biyometan üretim oranı %49.9 artış göstermiştir (Zhao vd. 2022).

2. BİYOKÜTLE ve TÜRKİYE'DE BİYOKÜTLE POTANSİYELİ

Biyokütle, bitkilerin güneş enerjisiyle fotosentez yaparak organik madde üretilip depoladıkları vejetatif organizmalardır. Biyoenerji, biyokütleden üretilen enerji ve enerji ile ilgili ürünleri tanımlamak için kullanılır. Biyokütle, atmosferdeki güneş ışığı yardımıyla karbondioksit ve suyun fotosentez reaksiyonunda birleşmesi sonucu oluşur:



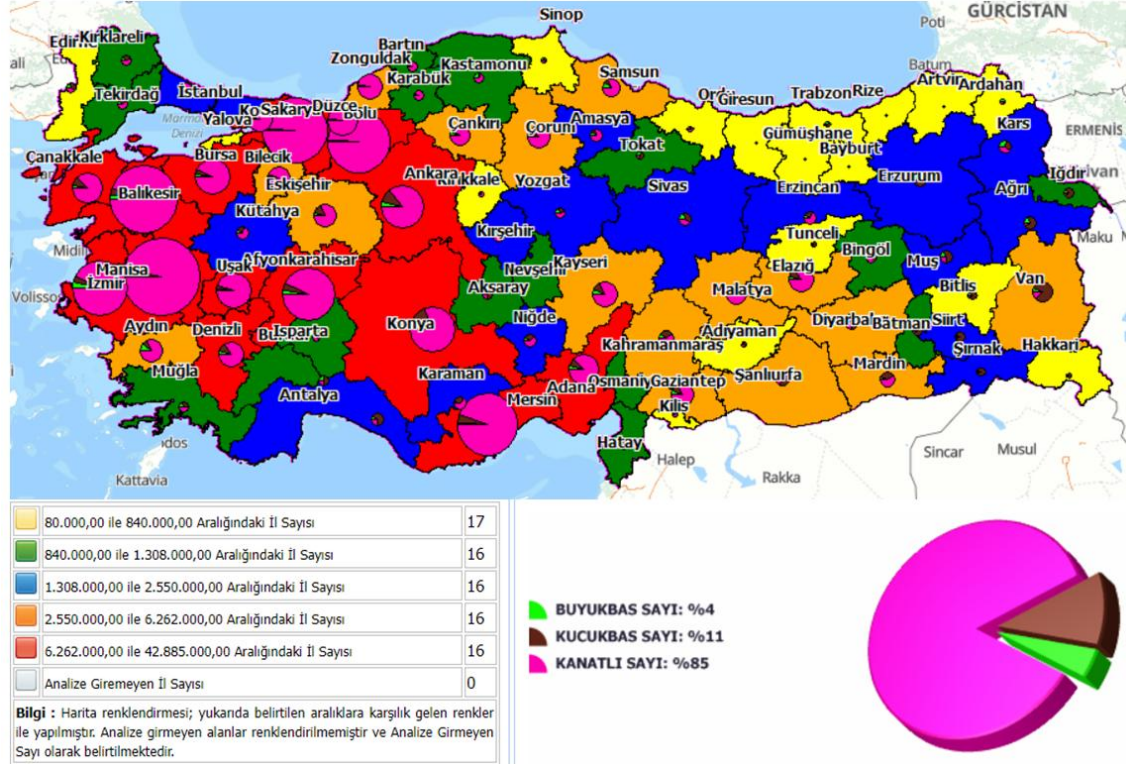
Biyoenerji odun, dal, saman, gübre, tarım artıkları vb.'den kolayca elde edilebilir. Biyokütle ya doğrudan ısı için ya da elektrik üretmek için yakılır. Bunların dışında alkol yakıtlarına fermente edilebilir, anaerobik olarak biyogaz üretmek için çürütülebilir ya da yüksek enerjili gaz üretmek için gazlaştırılabilir. Artan nüfusun gıda ihtiyaçlarını karşılamak için tarımsal genişleme ile birlikte, geleneksel biyoenerji kaynaklarının aşırı kullanımı, elle toplanan yakacak odun kıtlığının artmasına, ormansızlaşmaya ve çölleşmeye yol açmıştır. Buna rağmen kullanılmayan muazzam bir biyokütle potansiyeli vardır. Elbette bu potansiyel değerlendirilirken arazinin kullanımı konusunda dikkat edilmesi gereken noktalar vardır. Örneğin, biyoenerji üretimi için ormanlık alanlardaki ağaçların kesilmesi biyoenerjinin faydasını azaltacağı gibi olumsuz sonuçlarda doğurabilir veya zengin biyoçeşitlilik barındıran yerlerde biyoçeşitlilik azalabilir. Bununla birlikte biyokütle hammaddelerinin kullanımı toprak ve su kalitesinin düşmesini önler. Ekonomik açıdan bakıldığında biyoenerjiye katkı sağlayan sektörlerin artması yeni istihdam yaratmaktadır. Ek olarak üretilen biyoenerjinin küresel ihracatı da ekonomik büyümeyi beraberinde getirir. Sürdürülebilir metotlarla işlenen biyokütle, fosil bazlı yakıtlara göre ortalama %80 daha az emisyon üretmektedir. Sera gazı oluşturma potansiyeli düşük biyokütleyi verimli şekilde işlemek sera gazı miktarını da azaltır. Daha da ileri bir seviye olarak biyokütle yanma öncesinde havadan karbon aldığı için karbon yakalama ve depolama teknolojisiyle biyoenerji üretilirse atmosferdeki karbon dioksit miktarı da azalır. Biyokütle, ham haliyle verimsiz bir şekilde yanar. Bu nedenle enerjinin çoğu boşa harcanır. Örneğin, kırsal alanlarda yemek pişirmek için yakacak odun kullanıldığında, kişi başına enerji kullanımı gaz veya sıvı yakıtların kullanılmasından birkaç kat daha fazladır. Herhangi bir yeni biyoenerji

formunun verimi, ileri teknolojinin kullanımına bağılıdır. Bu nedenle, biyokütle potansiyelini gaz türbinlerine güç sağlayan modern biyoyakıtlar ve alkol yakıtları şeklinde araştırmak önemlidir (Kara vd. 2017). Türkiye’de biyokütle potansiyelini hayvansal atıklar, bitkisel atıklar, belediye atıkları ve orman varlığı atıkları oluşturmaktadır. Bu atıkların teorik enerji eşdeğerleri toplamı 34002549 TEP/yıl’dır ve 199 adet biyokütle kaynaklı elektrik üretim santrali operasyon gerçekleştirmektedir. 2022 yılı Cumhurbaşkanlığı Yıllık Programı’na göre 2022 sonu itibariyle Türkiye’nin kurulu elektrik gücünün 102423 MW’a ulaşması beklenmekte ve biyokütle, jeotermal ve atık ısı kurulu gücü bu sayının 3435 MW’lık kısmını oluşturmaktadır. Çizelge 2.1’de T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü’nden alınmış Türkiye’deki biyokütle potansiyeli ile ilgili detaylı güncel bilgiler verilmiştir (BEPA 2022, ELDER 2022).

Çizelge 2.1 Türkiye’deki biyokütle potansiyeli (BEPA 2022).

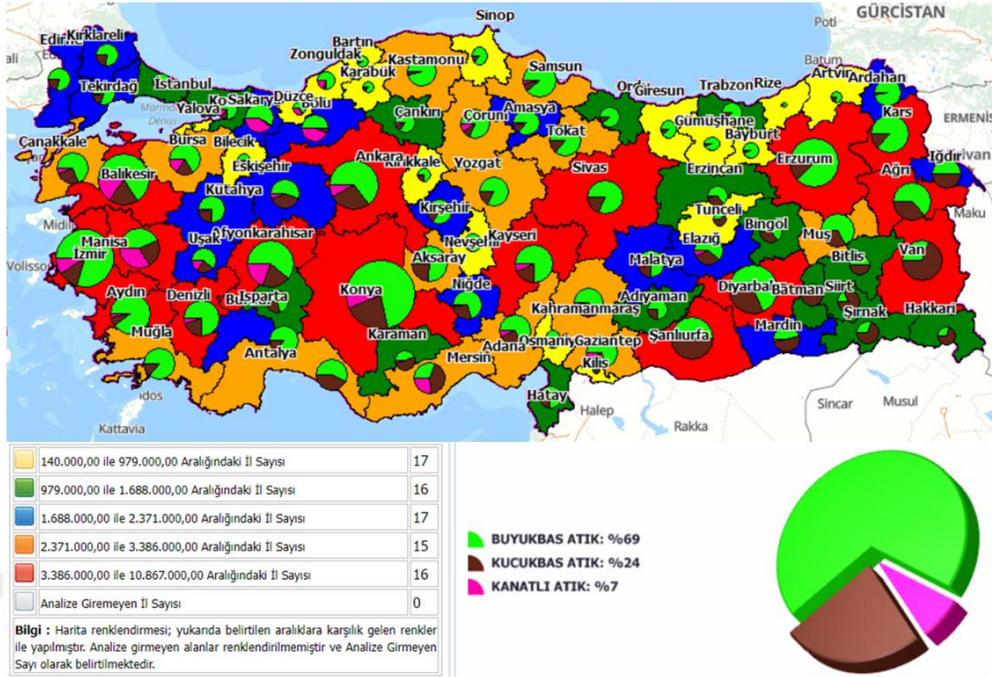
Hayvan Sayısı	<i>Büyükbaş hayvanlar</i>	17 497 113	422 832 374
	<i>Küçükbaş hayvanlar</i>	46 117 399	
	<i>Kanatlı hayvanlar</i>	359 217 862	
Hayvansal Atık Miktarı (ton/yıl)	<i>Büyükbaş hayvanlar</i>	134 150 417	193 878 079
	<i>Küçükbaş hayvanlar</i>	46 511 866	
	<i>Kanatlı hayvanlar</i>	13 215 796	
Hayvansal Atıkların Teorik Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	<i>Büyükbaş hayvanlar</i>	975 180	4 385 371
	<i>Küçükbaş hayvanlar</i>	105 648	
	<i>Kanatlı hayvanlar</i>	3 304 544	
Bitkisel Üretim Miktarı (ton/yıl)	<i>Tarla Bitkileri</i>	119 007 069	171 399 002
	<i>Bahçe Bitkileri</i>	22 359 106	
	<i>Sebze Bitkileri</i>	30 032 827	
Bitkisel Atık Miktarı (ton/yıl)	<i>Tarla Bitkileri</i>	46 279 245	62 206 754
	<i>Bahçe Bitkileri</i>	4 038 114	
	<i>Sebze Bitkileri</i>	11 889 396	
Bitkisel Atıkların Teorik Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	<i>Tarla Bitkileri</i>	1 225 364	25 384 268
	<i>Bahçe Bitkileri</i>	236 794	
Belediye Atık Miktarı (ton/yıl)	<i>Biyometanizasyona Uygun Olanlar</i>	14 476 939	32 170 975
	<i>Yakmaya Uygun Olanlar</i>	17 694 036	
Belediye Atıklarının Teorik Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	<i>Biyometanizasyona Uygun Olanlar</i>	466 881	3 373 011
	<i>Yakmaya Uygun Olanlar</i>	2 906 130	
Orman Varlığı Atıkları (ster/yıl)	<i>Endüstriyel Olarak Değerlendirilmeyenler</i>	3 529 319	3 914 904
	<i>Süceyrattan Elde Edilebilecekler</i>	385 585	
Orman Varlığı Atıklarının Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	-	859 899	859 899

Şekil 2.1’de Türkiye’deki büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan sayılarının illere göre dağılımı verilmiştir. Bu hayvanların çoğunluğunu kanatlı hayvanlar oluşturmaktadır ve görüldüğü gibi Türkiye’nin batı taraflarında yoğunlaşmaktadır. Büyükbaş ve küçükbaş hayvanlar Türkiye’nin geneline yayılmış durumdadır (BEPA 2022).



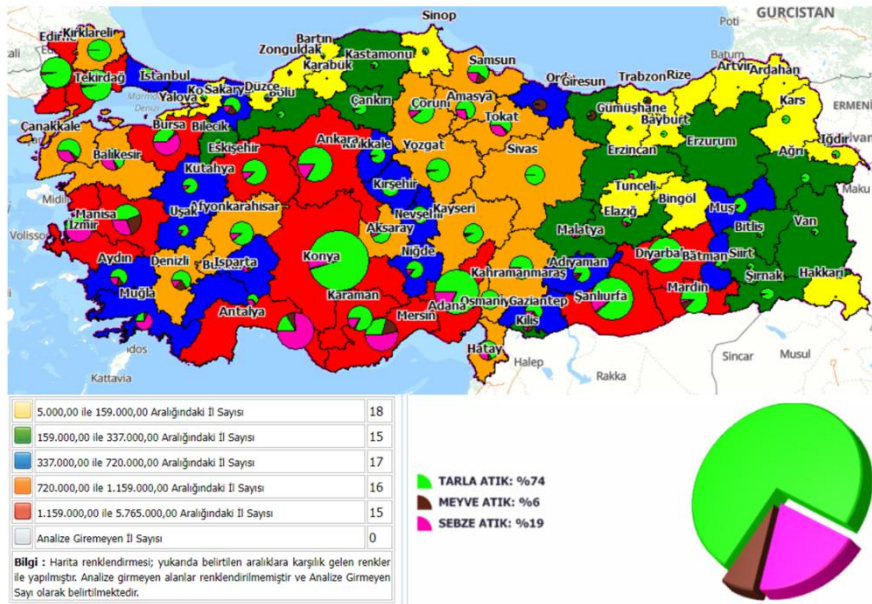
Şekil 2.1 Türkiye’deki hayvan sayısının illere göre dağılımı (BEPA 2022).

Şekil 2.2’de Türkiye’deki hayvansal atıklarının illere göre dağılımı verilmiştir. Sayıları kanatlı hayvanlara göre az olsa da hayvansal atıkların çoğunluğunu büyükbaş hayvanlar oluşturmaktadır; küçükbaş hayvanların büyükbaş hayvanlardan ciddi derecede fazla olduğu Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgesinde ise küçükbaş hayvanların atıkları bölgedeki atıkların çoğunluğunu oluşturmaktadır (BEPA 2022).



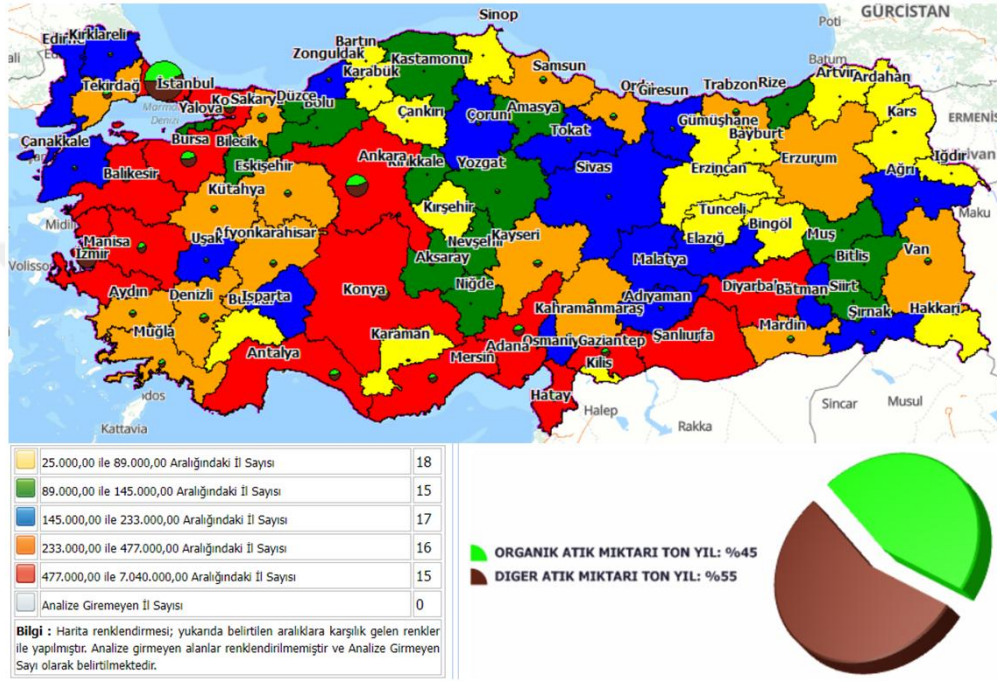
Şekil 2.2 Türkiye’deki hayvansal atıklarının illere göre dağılımı (ton/yıl) (BEPA 2022).

Şekil 2.3’te Türkiye’deki bitkisel atıklarının illere göre dağılımı verilmiştir. Bitkisel atıkların çoğunluğunu tarla atıkları oluşturmaktadır ve İç Anadolu bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Daha sonra sebze atıkları Ege, Karadeniz ve Akdeniz bölgesinde yoğunlaşmaktadır (BEPA 2022).



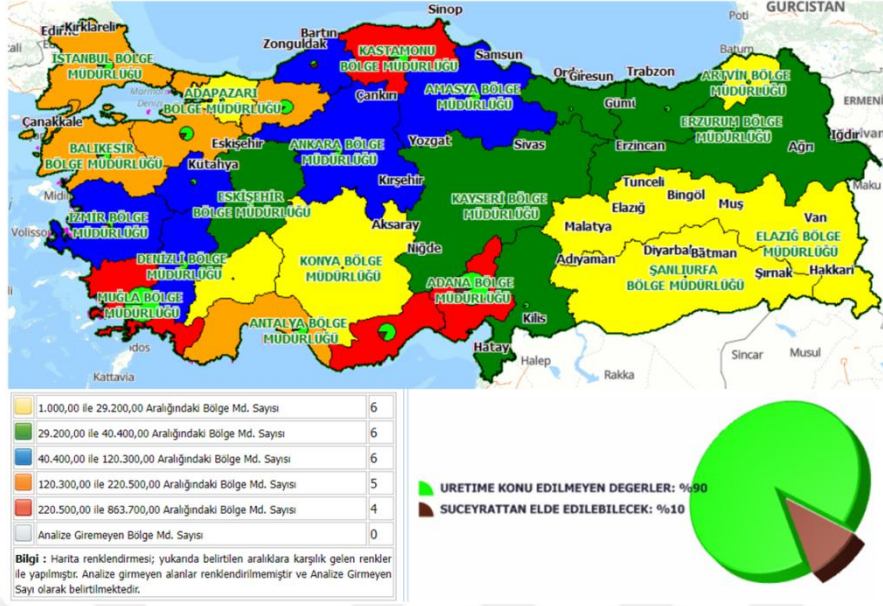
Şekil 2.3 Türkiye’deki bitkisel atıklarının illere göre dağılımı (ton/yıl) (BEPA 2022).

Şekil 2.4'te Türkiye'deki belediye atıklarının illere göre dağılımı verilmiştir. Belediye atıkları ev, ofis ve perakende olarak alt sınıflara ayrılır ve bu atıkların oluşumunda etkili olan iki faktör yörenin ekonomik gelişmişliği ve nüfusudur. Nüfusun fazla olduğu ve ekonominin gelişmiş olduğu yerlerde tüketim artırmakta ve belediye atıkları yoğunlaşmaktadır (BEPA 2022).



Şekil 2.4 Türkiye'deki belediye atıklarının illere göre dağılımı (BEPA 2022).

Şekil 2.5'te Türkiye'deki orman varlığı atıklarının illere göre dağılımı verilmiştir. Orman varlığı atıkları süceyrattan elde edilebilecek atıklara bağlıdır. Mevcut ormanlık alanların %90'ında kesim yapmak yasaktır. Süceyrattan elde edilebilecek atıklar Türkiye'de Akdeniz ve Marmara bölgesinde yoğunlaşmıştır (BEPA 2022).



Şekil 2.5 Türkiye'deki orman varlığı atıklarının illere göre dağılımı (BEPA 2022).

Şekil 2.6'da Türkiye'deki biyokütle kaynaklı lisanslı elektrik üretim santrallerinin illere göre dağılımı ve Şekil 2.7'de Türkiye'deki biyokütle kaynaklı lisanssız elektrik üretim santrallerinin illere göre dağılımı verilmiştir. Hayvansal atıklar, bitkisel atıklar, belediye atıkları ve orman varlığı atıklarının verimli şekilde değerlendirilmesi için bu atıkların en çok bulunduğu bölgelerde biyokütle kaynaklı elektrik üretim santralleri kurulmuştur. Atıkların ortak noktası çoğunlukla Türkiye'nin batısında bulunmalarıdır. Ekonomik yönden gelişmiş, nüfusu fazla, tarımın geliştiği ve hayvan yetiştiriciliğinin yoğun olduğu yerler bu santrallerin kapasite ve konumlarını belirlemede önemli rol oynar (BEPA 2022).



Şekil 2.6 Türkiye’deki biyokütle kaynaklı lisanslı elektrik üretim santrallerinin illere göre dağılımı (MWe) (BEPA 2022).



Şekil 2.7 Türkiye’deki biyokütle kaynaklı lisanssız elektrik üretim santrallerinin illere göre dağılımı (kWe) (BEPA 2022).

3. TERMODİNAMİK ANALİZ

Termodinamiğin temeli enerjidir. Enerji dengeleri, enerjinin miktarına odaklanır ve enerji dönüşüm sistemlerinin tasarımında ve analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu dengeler enerjinin kalitesi ve ne kadar verimli kullanıldığı konusunda bilgi veremez. Bir enerji kaynağının gerçek termodinamik değeri (kalitesi), bir odayı ısıtmak, bir gazı sıkıştırmak veya bir endotermik kimyasal reaksiyonu desteklemek gibi faydalı bir iş yapmak için enerji kaynağının bir şeyi değiştirme potansiyeli ile ifade edilir. Termal ve kimyasal enerjinin kalitesi, enerji taşıyıcısının ve çevrenin parametrelerine (sıcaklık, basınç ve kimyasal bileşim) bağlıyken; kinetik, potansiyel, mekanik ve elektrik enerjisi, ideal bir süreçte başka herhangi bir enerji biçimine tamamen dönüştürülebilir. Özellikle elektrik, bir elektrik santralindeki düşük basınçlı buhar veya soğutma suyu akışından açıkça daha yüksek bir kaliteye sahiptir (Demir 2012).

Termodinamikte, belirli bir miktardaki enerjinin kalitesi, ekserji ile karakterize edilir. Ekserji, bir termal sistemden elde edilebilecek teorik maksimum faydalı iştir (şaft işi veya elektrik işi). Çünkü referans ortam ile ısı transferi gerçekleşirken aynı zamanda termodinamik dengeye gelinir. Alternatif olarak ekserji, bir sistem oluşturmak ve sistemi belirli bir duruma getirmek için gereken teorik minimum iştir. Dolayısıyla ekserji, sistemin durumunun referans ortamının durumundan ayrılmasının bir ölçüsüdür. Tüm gerçek enerji dönüşüm sistemlerindeki süreçler geri döndürülemezdir (tersinmez) ve sisteme sağlanan toplam ekserjinin bir kısmı yok edilir. Sadece tersinir bir süreçte ekserji sabit kalır. Bir sistemin gerçek verimsizlikleri, sistem sınırları içinde meydana gelen ekserji yıkımları veya ekserji kayıplarıdır. Ekserji yıkımının yaygın nedenlerinden bazıları, kimyasal reaksiyonlar, sonlu bir sıcaklık farkı boyunca gerçekleşen ısı transferleri, akışkan sürtünmeleri, akış kısılmaları ve farklı sıvıların karışmasıdır (Demir 2012). Bu bölümde bir biyogaz santralinin termodinamik analizinde kullanılan enerji ve ekserji yasaları sunulmuştur. Termodinamik analiz hem ekipman hem de santral seviyesinde denklemler içermektedir.

Kütlenin korunumu yasasına göre, bir süreçte bir sisteme veya sistemden net kütle transferi, sistemin kütledeki değişime eşittir. Yani g ve \dot{c} indisleri sırasıyla giriş ve

çıkış durumlarını ve t zamanı temsil etmek üzere,

$$\sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_\zeta = \frac{\partial \dot{m}_{sistem}}{\partial t} \quad (3.1)$$

olur (Bejan vd. 1995). Eğer herhangi bir süre boyunca kontrol hacminde kütle miktarı değişmediğinde akış sabit debilidir ve giriş ile çıkış debileri birbirine eşittir. Bu durumda,

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\zeta \quad (3.2)$$

olur (Bejan vd. 1995). Enerji açısından bakıldığında, termodinamiğin birinci yasası enerjinin ne vardan yok edilebileceğini ne de yoktan var edilebileceğini, yalnızca türünün değişebileceğini söyler. Enerjinin korunumu prensibine göre, bir sisteme giren veya sistemden çıkan enerjilerin toplamı, sistemin toplam enerjisindeki değişime eşittir. Yani,

$$\sum \dot{E}_g - \sum \dot{E}_\zeta = \Delta \dot{E}_{sistem} \quad (3.3)$$

olur (Bejan vd. 1995). Eğer sistemin toplam enerjisi belli bir süre sabitse enerjisindeki değişim sıfırdır ve,

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_\zeta \quad (3.4)$$

olur (Bejan vd. 1995). Enerjinin yalnızca iş, ısı ve kütleli debi ile taşındığı bilindiğinden denklem 3.4'te verilen eşitlik detaylandırılırsa, \dot{Q} ısıyı, \dot{W} gücü, h özgül entalpiyi, g yer çekimi ivmesini, z yüksekliği ve \mathcal{G} hızı temsil etmek üzere,

$$\dot{Q}_g + \sum \dot{m}_g \left(h_g + gz_g + \frac{\mathcal{G}_g^2}{2} \right) + \dot{W}_g = \dot{Q}_\zeta + \sum \dot{m}_\zeta \left(h_\zeta + gz_\zeta + \frac{\mathcal{G}_\zeta^2}{2} \right) + \dot{W}_\zeta \quad (3.5)$$

olur (Bejan vd. 1995). Ekserji açısından bakıldığında, termodinamiğin ikinci yasasından termodinamik analiz, ekserji yaklaşımına dayalı olarak uygulanır. Böyle bir araştırma, enerji bazlı analize göre daha rasyonel sonuçlara ulaşılmasını sağlar. İlk olarak ekserjinin tanımında yer alan çevre sıcaklığı ve basıncı çevre şartları olarak belirlenir. Örneğin, bir biyogaz güç santralinde ekserji analizi yapılırken çevre sıcaklığı ve basıncı kompresöre alınan hava sıcaklığı ve basıncıdır. Birçok çalışmada ise standart olarak 298.15 K ve 101325 Pa olarak alınır. Seçilen sistemde çevre şartlarında herhangi bir güç üretimi veya ısı transferi gerçekleşmeyeceğinden çevre şartları ölü hal olarakta bilinir. Dolayısıyla çevrenin ekserjisi de sıfır olur. Bu tip kimyasal reaksiyonlar ile enerji üretiminin yapıldığı çalışmalarda ekserjiyi fiziksel ekserji, kimyasal ekserji, kinetik ekserji ve potansiyel ekserji oluşturur. Eğer sistem kütle akışına sahipse açık sistem; sahip değilse kapalı sistemdir. Kapalı bir sistemde özgül ekserji,

$$ex_{sistem} = ex^{Fiz.} + ex^{Kim.} + ex^{Kin.} + ex^{Pot.} \quad (3.6)$$

olur (Bejan vd. 1995). Dolayısıyla sistemin ekserjisi,

$$Ex_{sistem} = Ex^{Fiz.} + Ex^{Kim.} + Ex^{Kin.} + Ex^{Pot.} \quad (3.7)$$

olur. Her bir ekserji türü incelenecek olursa öncelikle 0 indisi çevre şartlarını, u özgül iç enerjiyi, P basıncı, v özgül hacmi, T sıcaklığı ve s özgül entropiyi temsil etmek üzere kapalı bir sistemin özgül fiziksel ekserjisi,

$$ex_{sistem}^{Fiz.} = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) \quad (3.8)$$

olur (Bejan vd. 1995). Sistem açık bir sistem ise özgül fiziksel ekserji,

$$ex_{sistem}^{Fiz.} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (3.9)$$

olur (Bejan vd. 1995). x_k ve $\bar{e}x_k^{Kim.}$ sırasıyla bir karışımdaki k. bileşenin mol fraksiyonu ve standart kimyasal ekserjisi olmak üzere bir gaz karışımının kimyasal ekserjisi,

$$\bar{e}_{kar.}^{Kim.} = \sum x_k \bar{e}x_k^{Kim.} + \bar{R}T_0 \sum x_k \ln x_k \quad (3.10)$$

olur (Bejan vd. 1995). Bu noktada $\bar{e}x_k^{Kim.}$ 'nin hesaplanması gerekir. $\bar{e}x_k^{Kim.}$ ise HV ısı değeri, α gaz yakıtlar için hesaplanan bir katsayı, h , c ve N_c sırasıyla standart kimyasal ekserjisi hesaplanan yakıt bileşeninde hidrojen ve karbonun kütleli fraksiyonları ve ortalama karbon atomlarının sayısı olmak üzere,

$$\bar{e}x_k^{Kim.} = HV \cdot \alpha \quad (3.11)$$

$$\alpha = 1.0334 + 0.0183 \cdot \frac{h}{c} - 0.0694 \cdot \frac{1}{N_c} \quad (3.12)$$

olur (Bejan vd. 1995). Üretilen biyokütlenin kimyasal ekserjisi ise β biyokütle için hesaplanan bir katsayı, Z_H , Z_C ve Z_O sırasıyla hidrojen, karbon ve oksijenin molekül içindeki ağırlık fraksiyonları olmak üzere,

$$ex_{biyokütle}^{Kim.} = \beta \times HV_{biyokütle} \quad (3.13)$$

$$\beta = \frac{1.044 + 0.016 \frac{Z_H}{Z_C} - 0.3493 \frac{Z_O}{Z_C} \left(1 + 0.0531 \frac{Z_H}{Z_C} \right)}{1 - 0.4124 \frac{Z_O}{Z_C}} \quad (3.14)$$

olur (Bejan vd. 1995). Kinetik ve potansiyel ekserjiler açısından bakıldığında,

$$ex^{Kin.} = \frac{g^2}{2} \quad (3.15)$$

$$ex^{Pot.} = gz \quad (3.16)$$

olur (Bejan vd. 1995).

Ekserjinin önemli noktalarından biri de tersinmezliktir. Tersinmezlik bir sonlu sıcaklık farkı ile gerçekleşen ısı transferi, yanma, sürtünme, sonsuz genişleme ve karışım

oluşturma gibi sebeplerle meydana gelen entropi üretiminin genel adıdır. Oluşan entropi sonucu ekserji de bir kayıp meydana gelir ve buna ekserji yıkımı veya yok olan ekserji adı verilir. Her bir bileşene ait ekserji yıkımlarının toplamı, bileşenlerin oluşturduğu sisteme ait toplam ekserji yıkımına eşit olur. Bu noktada, ekserji yıkımı fraksiyonları hesaplanarak en çok ekserji yıkımının hangi bileşenlerde olduğu görülebilir ve bu ekipmanlarda iyileştirmeler yapılabilir. Ekserji yıkımının genel formülü,

$$\dot{E}x_{yok,k} = T_0 \dot{S}_{üret.k} \quad (3.17)$$

$$\dot{E}x_{yok,sistem} = \sum_{k=1} \dot{E}x_{yok,k} \quad (3.18)$$

$$Fr_{k, \dot{E}x_{yok,sistem}} = \frac{\dot{E}x_{yok,k}}{\sum_{k=1} \dot{E}x_{yok,k}} \quad (3.19)$$

dir (Bejan vd. 1995). Ayrıca bir bileşendeki ekserji yıkımı denklem 3.17'den farklı olarak bileşene gelen yakıt ekserjisi (indis F) ve bileşenden çıkan ürün (indis P) ekserjisi mantığı ile ekserji dengesi kurularak hesaplanabilir. Yani $\dot{E}x_{ters.,k}$ k. bileşendeki tersinmezlik ekserjisi olmak üzere,

$$\dot{E}x_{yok,k} = \dot{E}x_{F,k} - \dot{E}x_{P,k} - \dot{E}x_{ters.,k} \quad (3.20)$$

olur. Q_k ve T_k sırasıyla sınırdan transfer edilen ısı miktarı ve sınır sıcaklığını temsil etmek üzere, ekserji dengesi denklemi kapalı ve açık sistemler için sırasıyla aşağıdaki gibidir:

$$\Delta E x_{sistem} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) Q_k - [W - P_0(\Delta V)] - T_0 S_{üret.} \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial \dot{E}x_{sistem}}{\partial t} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \left[\dot{W} - P_0 \left(\frac{\partial V_{sistem}}{\partial t} \right) \right] - T_0 \dot{S}_{üret.} + \sum \dot{m}_g ex_g - \sum \dot{m}_\zeta ex_\zeta \quad (3.22)$$

Toplam ekserji yıkımındaki bileşen fraksiyonları, bir sistemdeki benzer ekipmanların

ekserji kayıplarını kıyaslamak için etkili bir yöntem olsa da benzer olmayan ekipmanlar için doğru bir yöntem olmaz. Bu durumda her bir bileşeni kendi ekserji verimi ile değerlendirmek daha doğru olur. Bir bileşende ürün ekserjisi oranının yakıt ekserjisi oranına oranı, bileşenin ekserji verimini veya ikinci yasa verimini verir. Yani,

$$\eta_{ekserji,k} = \frac{\dot{E}x_{P,k}}{\dot{E}x_{F,k}} \quad (3.23)$$

olur. Santralin performansı incelendiğinde, santral verimi santralin ürettiği her türlü faydalı gücün toplamının santrale giren yakıt enerjisine oranıdır. Bu çalışmadaki modellerde elektrik ve ısıtma – soğutma gücü üretildiğinden santral verimleri aşağıdaki gibi olur:

$$\eta_{enerji} = \frac{\dot{W}_{elek.}}{\dot{m}_F HV_F} \quad (3.24)$$

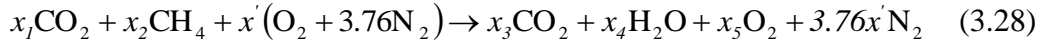
$$\varepsilon_{kullanım} = \frac{\dot{W}_{elek.} + \dot{Q}_{ısıt.} + \dot{Q}_{soğ.}}{\dot{m}_F HV_F} \quad (3.25)$$

Santralin ekserji verimi için enerji verimi ile benzer bir denklem kullanılır. Ekserji verimi bu çalışmadaki modeller için üretilen elektriğin ekserjisinin yakıt ekserjisine oranı ve üretilen ısıtma – soğutma ekserjileri toplamının yakıt ekserjisine oranı olarak tanımlanır. Burada elektrik gücü, mil gücü, kinetik güç ve potansiyel güç, aynı zamanda ekserjilerine eşittir. Dolayısıyla,

$$\eta_{ekserji} = \frac{\dot{E}x_{elek.}}{\dot{m}_F ex_F^{Kim.}} = \frac{\dot{W}_{elek.}}{\dot{m}_F ex_F^{Kim.}} \quad (3.26)$$

$$\eta_{ekserji} = \frac{\dot{E}x_{elek.} + \dot{E}x_{ısıt.} + \dot{E}x_{soğ.}}{\dot{m}_F ex_F^{Kim.}} \quad (3.27)$$

olur. Anaerobik çürüme ile üretilen biyogaz, haznedeki basınçlı sıcak hava ile tamamen yakılır. Bu reaksiyon kimyasal formda şu şekilde ifade edilir:



Burada x' yanmaya giren havanın kilomol cinsinden katsayısıdır. Yanma odasını modellemek için gereken diğer denklem enerji dengesidir. Adyabatik koşullar için şu şekilde uygulanabilir:

$$\sum x_i (\bar{h}_{f,i}^0 + \Delta\bar{h})_{biyogaz} + \sum x_i (\bar{h}_{f,i}^0 + \Delta\bar{h})_{hava} = \sum x_e (\bar{h}_{f,e}^0 + \Delta\bar{h})_{ürün} \quad (3.29)$$

tr indisi tersinirliği, ΔG suyun serbest Gibbs enerjisini, ΔH enerji girdisi olarak suyun ayrışmasının entalpi değişimidir. ΔS entropi üretimini ve $\dot{W}_{elekt.}$ elektroliz için gereken gücü temsil etmek üzere, Model 3'te yapılan suyun elektrolizinde sabit basınç ve sıcaklıkta çalışan bir elektrokimyasal süreç için, mümkün olan maksimum faydalı iş Gibbs enerjisindeki değişime eşittir:

$$\dot{W}_{tr, elekt.} = \Delta G_{elekt., su} \quad (3.30)$$

$$\eta_{enerji} = \frac{\dot{W}_{tr, elekt.}}{\dot{W}_{elekt.}} \quad (3.31)$$

$$\Delta G + T_{elekt.} \Delta S = \Delta H \quad (3.32)$$

olur. J akım yoğunluğu, F Faraday sabiti (96500 C/mol) ve MW_{H_2} hidrojenin molar ağırlığı olmak üzere üretilen hidrojen debisi için,

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{J}{2F} MW_{H_2} \quad (3.33)$$

yazılabilir. n transfer edilen elektronların sayısı olmak üzere elektroliz gerilimi ve entalpi gerilimi sırasıyla,

$$E = \frac{\Delta G}{nF} \quad (3.34)$$

$$V' = \frac{\Delta H}{nF} \quad (3.35)$$

olur. ORC ünitesinin ürettiği elektrik gücü,

$$\dot{W}_{elektrik} = JxE \quad (3.36)$$

olur. Son olarak elektroliz ünitesinin genel enerji verimi ve ekserji verimi sırasıyla,

$$\eta_{enerji} = \frac{HV_{H_2} \dot{m}_{H_2}}{\dot{W}_{elektrik}} = \frac{HV_{H_2} \dot{m}_{H_2}}{\dot{W}_{ORC}} \quad (3.37)$$

$$\eta_{ekserji} = \frac{\dot{E}x_{H_2} + \dot{E}x_{O_2}}{\dot{W}_{ORC} + \dot{E}x_{H_2O}} \quad (3.38)$$

olur (Yılmaz 2015, Demir 2012). Bu şekilde elektrik üretimi, ısıtma – soğutma ve hidrojen üretimi için enerji ve ekserji analizleri yapılabilir. Analiz için yapılan kabuller aşağıdaki gibidir (Melikoğlu ve Menekşe 2020, Stark vd. 2019):

- İş akışkanının borular veya ısı eşanjörleri gibi bileşenlerden akışı sırasındaki basınç düşüşü ihmal edilir (Scaccabarozzi vd. 2018),
- Sistem bileşenlerini birbirine bağlayan borularda kaçak yoktur,
- Tüm sıkıştırma ve genişleme süreçleri sanki – dengelidir,
- Akış hızları sabittir,
- Metanın standart kimyasal ekserjisi 831650 kJ/kmol'dür (Bejan vd. 1995),
- Yanma odasının ısı kaybı %2 ($\eta_{enerji, YO} = \%98$) (Bejan vd. 1995),
- Yanmada giriş ve çıkış gazlarının özellikleri gerçek gaz özellikleridir,
- Yanma tam yanmadır,
- Yanma odasına giren havanın bileşenleri O₂ – %21 ve N₂ – %79 şeklindedir.

Çizelge 3.1 'de santrale ait termodinamik özellikler ve kabuller verilmiştir.

Çizelge 3.1 Santrale ait termodinamik özellikler ve kabuller (Köse vd. 2020).

Özellik	Değer
Gaz çevriminin net çıkış elektrik gücü	4000 kW
Biyogazın ısı değeri Model 1 ve 2 / Model 3	32000 kJ/kg / 53000 kJ/kg
Kompresör, türbin ve pompa izentropik verimleri	%85
Atmosferik şartlar	100 kPa ve 300 K
Hava – Yakıt oranı Model 1 ve 2 / Model 3	66.64 / 50
Sıkıştırma oranı Model 1 ve 2 / Model 3	8 / 6
Ön ısıtıcı verimi	%80
Soğutma ünitesi rejeneratör verimi	%70
Hidrojen Isıl Değeri (kJ/kg)	120210

4. TERMOEKONOMİK ANALİZ

Termoekonomi, sistem tasarımcısına veya operatörüne bir sistemin tasarımı ve işletilmesi için önemli bilgileri sağlamak için ekserji analizi ve ekonomik ilkeleri birleştiren bir dal veya mühendisliktir. Termoekonomi ekserji destekli maliyet minimizasyonu olarak düşünülebilir. Termoekonominin termodinamik değerlendirmeleri ekserji kavramına dayandığından, eksergoekonomi terimi aynı zamanda ekserji analizi ve ekonominin birleşimini tanımlamak için de kullanılabilir. Bu bölümde santralin termodinamik verimsizliklerini (ekserji yıkımları veya ekserjetik kayıpları) değerlendirmek için teknikler sunulmuştur. Ancak, genellikle bu tür verimsizliklerin maliyetinin ne kadar olduğunun bilinmesi gerekir. Bu maliyetlerin bilinmesi, sistemin maliyet etkinliğinin iyileştirilmesi için, yani sistem tarafından üretilen nihai ürünlerin maliyetlerinin düşürülmesi için çok yararlıdır. Ayrıca bir sistemin birden fazla ürünü varsa her bir ürün için üretim maliyetlerinin bilinmesi istenir. Tesis operatörü, her bir kamu hizmetinin üretildiği gerçek maliyeti bilmek ister; bu maliyetler daha sonra, nihai ürünü üretmek için kullanılan her bir hizmetin türüne ve miktarına göre uygun nihai ürünlere yansıtılır. Bir termal sistemin tasarımında bu tür bir maliyet tahsisi, maliyet etkinliği olmayan süreç ve işlemlerin belirlenmesine ve sistemin maliyet etkinliğini iyileştirebilecek teknik seçeneklerin belirlenmesine yardımcı olur. Buna göre, bir termoekonomik analizin amacı, (a) birden fazla ürüne sahip bir sistem tarafından üretilen her bir ürünün maliyetlerini ayrı ayrı hesaplamak, (b) maliyet oluşum sürecini ve sistemdeki maliyetlerin akışını anlamak, (c) belirli değişkenleri tek bir bileşende optimize etmek veya (d) tüm sistemi optimize etmektir. Dolayısıyla bu bölümde maliyet dengeleri, ekserji transferlerinin maliyetlendirilmesi için araçlar ve termal sistemlerin tasarımının değerlendirilmesinde ve optimizasyonunda kullanılan çeşitli termoekonomik değişkenleri içeren termoekonominin esasları sunulmuştur (Bejan vd. 1995).

4.1 Ekonomik Analiz

Bir termal tasarım projesinin başarılı bir şekilde tamamlanması ekonomik, teknolojik ve yasal ortamlara dayanan çeşitli varsayımları ve tahminleri göz önünde bulundurularak

ve mühendislik ekonomisi teknikleri kullanarak projeye dahil olan ana maliyetlerin (örneğin, ekipman maliyeti, yakıt maliyeti, işletme ve bakım giderleri ve nihai ürünlerin maliyeti) tahmin edilmesini gerektirir. Bu sayede ürün maliyetinin piyasaya göre ne noktada olduğu görülür. Her şirketin ekonomik bir analiz yapmak ve ana ürünün maliyetini hesaplamak için tercih ettiği kendi yaklaşımı vardır. Bu çalışmada ise “toplam gelir gereksinimi (TRR (total revenue requirement))” yöntemi uygulanmıştır. Birim maliyetleri elde etmek için ekipman satın alma maliyeti (C), işletme ve bakım maliyeti (OMC), sermaye geri kazanım faktörü (CRF) ve birim akış maliyeti (c) gibi birçok değişkeni hesaplamak gerekir. Ekipman satın alma maliyetleri, güncel maliyetleri içeren Aspen Plus yazılımından alınmıştır. $\varphi = 1.06$ işletme ve bakım faktörü, $i = \%15$ faiz oranı ve $n = 20$ santralin yıl cinsinden çalışma ömrü olarak dikkate alınmıştır. Bu durumda CRF ,

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (4.1)$$

olur (Bejan vd. 1995). Bu durumda her bir ekipmanın maliyet oranı,

$$\dot{Z}_k = \frac{C_k (CRF) \varphi}{(n \times 3600)} \quad (4.2)$$

olur (Bejan vd. 1995). Burada t yıl içinde saat cinsinden operasyon süresi olmak üzere,

$$t = 365 \times 24 \times 0.9 \quad (4.3)$$

dur. r_n yatırımın nominal artış oranı ve $C_{L,OM}$ seviyelendirilmiş işletme ve bakım maliyeti olmak üzere k . bileşenin yıllık sermaye yatırım maliyet oranı \dot{Z}_k^{CI} ve işletme ve bakım maliyet oranı \dot{Z}_k^{OM} sırasıyla sermaye yatırımının yıllık katkısının ve yıllık işletme ve bakım maliyetlerinin, operasyon süresine (genellikle saat veya saniye) bölünmesiyle hesaplanır:

$$\dot{Z}_k^{CI} = \frac{C_k (CRF)}{t} (r_n + 1)^2 \quad (4.4)$$

$$\dot{Z}_k^{OM} = \frac{(CRF) C_{L,OM}}{t} \frac{C_k}{\sum_k C_k} \quad (4.5)$$

olur (Bejan vd. 1995).

4.2 Termoekonominin Esasları

Bir şirkette maliyet muhasebesi, öncelikle (a) ürün veya hizmetlerin fiili maliyetinin belirlenmesi, (b) mal veya hizmetlerin fiyatlandırılması için rasyonel bir temel sağlanması, (c) harcamaların tahsisi ve kontrolü için bir araç sağlanması ve (d) hangi işletme kararlarının temel alınabileceği ve değerlendirilebileceği hakkında bilgi sağlamakla ilgilidir. Bu genellikle maliyet dengelerinin kullanılmasını gerektirir. Geleneksel bir ekonomik analizde, genellikle sabit durumda çalışan genel sistem (gs) için bir maliyet dengesi formüle edilir. $\dot{C}_{P,gs}$ ve $\dot{C}_{F,gs}$ ürün ve yakıt maliyet oranları ve \dot{Z}_{gs}^{CI} ve \dot{Z}_{gs}^{OM} sermaye yatırımı ve işletme ve bakım maliyet oranları olmak üzere,

$$\dot{C}_{P,gs} = \dot{C}_{F,gs} + \dot{Z}_{gs}^{CI} + \dot{Z}_{gs}^{OM} \quad (4.6)$$

olur (Bejan vd. 1995). Bu iki değişkenin toplamı ise toplam maliyet oranını verir ve \dot{Z} ile gösterilir (Bejan vd. 1995):

$$\dot{Z} = \dot{Z}^{CI} + \dot{Z}^{OM} \quad (4.7)$$

Özetle \dot{C} madde akışı, güç veya ısı transferi ile ekserji akışıyla ilgili maliyet oranını gösterirken \dot{Z} kalan tüm maliyetleri temsil etmektedir. Kararlı durumda çalışan bir sistemde, çevre ile hem ısı hem de iş etkileşimlerinin yanı sıra bir dizi giren ve çıkan madde akışı olabilir. Bu madde ve enerji transferleriyle ilgili olarak sistem içine ve dışına ekserji transferleri ve sistem içindeki tersinmezliklerin neden olduğu ekserji

yıkımları söz konusudur. Ekserji, bu tür etkilerin gerçek termodinamik değerini ölçmektedir. Bu yüzden, termal sistemlerde maliyetlerin belirlenmesinde ekserjinin bir temel olarak kullanılması mantıklıdır. Aslında bu yüzden termoekonomi, bir termal sistemin çevresiyle gerçekleştirdiği etkileşimlere ve içindeki verimsizlik kaynaklarına maliyet atamak için tek rasyonel temelin ekserji olduğu fikrine dayanır. Bu yaklaşıma ise birim ekserji maliyetlendirmesi (SPECO) denir. Ekserji maliyetlendirmesinde her bir ekserji akışı bir maliyet ile ilişkilendirilir. Burada \dot{E}_q ısı transferi ile ilişkili ekserji transfer oranı, \dot{W} güç ile ilişkili ekserji oranı ve \dot{E}_g ve \dot{E}_ζ giren ve çıkan madde akışı ile ekserji transfer oranı olmak üzere,

$$\dot{C}_g = c_g \dot{E}_g = c_g (\dot{m}_g ex_g) \quad (4.8)$$

$$\dot{C}_\zeta = c_\zeta \dot{E}_\zeta = c_\zeta (\dot{m}_\zeta ex_\zeta) \quad (4.9)$$

$$\dot{C}_w = c_w \dot{W} \quad (4.10)$$

$$\dot{C}_q = c_q \dot{E}_q \quad (4.11)$$

olur (Bejan vd. 1995). Burada verilen c_g , c_ζ , c_w ve c_q birim ekserji maliyeti olarak tanımlanır ve birimi \$/GJ'dür. Ekserji maliyeti, genellikle her bileşen için ayrı ayrı formüle edilen maliyet dengelerini içerir. k. sistem bileşenine uygulanan bir maliyet dengesinde, bileşenden çıkan tüm ekserji akışlarıyla ilişkili maliyet oranlarının toplamı, bileşene giren tüm ekserji akışlarıyla ilgili maliyet oranlarının ve toplam maliyet oranının toplamına eşittir. Buna göre, ısı transferi alan ve güç üreten bir bileşen için şu şekilde bir denklem yazılabilir (Bejan vd. 1995):

$$\sum_g \dot{C}_{g,k} + \dot{C}_{q,k} + \dot{Z}_k = \sum_\zeta \dot{C}_{\zeta,k} + \dot{C}_{w,k} \quad (4.12)$$

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM} \quad (4.13)$$

Daha net bir ifade ile bir ekipman için giriş durumundaki tüm ekserji akış maliyetleri, işletme ve bakım maliyeti ve sermaye yatırım maliyetinin toplamı, çıkış durumundaki tüm ekserji akış maliyetlerinin toplamıdır. Dikkat edilmesi gereken bir nokta ise denklem 4.12'nin güç üreten bir ekipman için yazılmış olmasıdır. Pompa veya

kompresör gibi güç çekerek çalışan ekipmanlar için $\dot{C}_{w,k}$ ifadesi eşitliğin diğer tarafına işaret değiştirmeden (pozitif olarak) geçer. Yani bu ifade ekipmanın giriş ekserji maliyetlerinden biri haline gelir. Ek olarak, ekipmandan dışarı doğru ısı transferi varsa denklemdeki $\dot{C}_{q,k}$ ifadesi de eşitliğin diğer tarafına işaret değiştirmeden geçer. Yani bu ifade ekipmanın çıkış ekserji maliyetlerinden biri haline gelir. Maliyet dengesi denklemleri genellikle tüm ifadeler pozitif olacak şekilde yazılır. 4.3 ve 4.6 aralığındaki tüm denklemler 4.12 ve 4.13 denklemlerinde yerlerine yazılırsa,

$$\sum_g (c_g \dot{E}_g)_k + c_{q,k} \dot{E}_{q,k} + \dot{Z}_k = \sum_\zeta (c_\zeta \dot{E}_\zeta)_k + c_{w,k} \dot{W}_k \quad (4.14)$$

olur (Bejan vd. 1995). Bir ekipman analiz edilirken, ekipmana giren tüm akışlar için birim ekserji maliyetlerinin bilindiğini varsayılabilir. Bu maliyetler, çıktıkları bileşenlerden bilinebilir veya bir akış, tüm ekipmanların oluşturduğu genel sisteme girerse, akışın satın alma maliyetinden bilinir (Bejan vd. 1995).

5. OPTİMİZASYON

Optimal terimi, uygulamaya bağlı olarak birçok farklı türde bulunabilir. Optimizasyon, sistemin güvenli çalışabilirliği, güvenilirliği, kullanılabilirliği ve bakımı ile birlikte mevcut malzemeler, finansal kaynaklar, çevrenin korunması ve ilgili sınır koşulları altında sistem ürünlerinin toplam seviyelendirilmiş maliyetini en aza indirmek için bir sistemin yapısının ve tasarım parametrelerinin değiştirilmesi anlamına gelir. Bir termodinamik optimizasyon, ekserji yıkımları veya ekserjetik kayıplar gibi termodinamik verimsizlikleri en aza indirmeyi amaçlar. Bununla birlikte, termoekonomik optimizasyonun amacı, termodinamik verimsizliklerden kaynaklanan maliyetler de dahil olmak üzere maliyetleri en aza indirmektir. Termal sistem tasarımında mühendislerin, hangi prosesler veya ekipman öğeleri seçilmeli ve nasıl düzenlenmeli gibi soruları yanıtlamaları gerekmektedir. Sistemdeki her akışın en iyi sıcaklığı, basıncı, akış hızı ve kimyasal bileşimi nedir? Bu soruyla ilişkili olarak sistemin sahip olabileceği en uygun hava – yakıt oranı kaçtır? Bu soruları yanıtlamak için, uygun bir optimizasyon problemi formüle edilmelidir. Uygun problem formülasyonu, başarılı bir optimizasyon çalışmasının genellikle en önemli ve bazen en zor adımıdır (Bejan vd. 1995).

Bir optimizasyonda ilk adım, optimize edilecek sistemin sınırlarını tanımlamaktır. İncelenen sistemin performansını önemli ölçüde etkileyen tüm alt sistemler optimizasyon problemine dahil edilmelidir. Sistem karmaşıksa genellikle ayrı ayrı optimize edilebilecek daha küçük alt sistemlere bölünür. Bu gibi durumlarda alt sistem sınırlarının seçimi çok önemlidir, çünkü optimizasyon sonuçları bu seçimden de etkilenebilir (Bejan vd. 1995).

Sistem tasarımının değerlendirileceği ve optimize edileceği optimizasyon kriterlerinin seçimi, bir optimizasyon probleminin formüle edilmesinde kilit bir unsurdur. Optimizasyon kriterleri ekonomik (toplam sermaye yatırımı, toplam yıllık seviyelendirilmiş maliyetler, yıllık seviyelendirilmiş net kâr, yatırım getirisi), teknolojik (termodinamik verim, üretim süresi, üretim oranı, güvenilirlik, toplam ağırlık vb.) ve çevresel (örneğin, yayılan egzoz gazı oranları) olabilir. Optimize edilmiş bir tasarım,

seçilen her bir kriter için uygun olan bir minimum veya maksimum değer ile karakterize edilir. Uygulamada, genellikle birden fazla kritere göre en iyi tasarımın geliştirilmesi arzu edilir. Bu kriterler genellikle birbirleriyle rekabet ettiğinden yani her birinin en iyi değerine ulaşma isteğinin diğerini kısıtlayabilmesinden, bir çözüm bulmak zordur. Örneğin verimi ve güvenilirliği en üst düzeye çıkarırken maliyetleri ve çevresel etkiyi aynı anda en aza indirmek imkânsızdır (Bejan vd. 1995).

Bir optimizasyon probleminin formüle edilmesinde ki bir diğer temel unsur, olası tasarım seçeneklerini yeterli şekilde karakterize eden bağımsız değişkenlerin seçimidir. Bu değişkenleri seçerken, (a) sistemin performansını ve maliyet etkinliğini etkileyen tüm önemli değişkenleri dahil etmeye, (b) çok detaylı veya önemsiz değişkenleri seçmemeye ve (c) değerleri değişebilen bağımsız değişkenler arasında ayırım yapmaya ihtiyaç duyulur. Örneğin bir ön tasarımda, genellikle her bir sistem bileşeninin tasarımının ayrıntılarını dikkate almak gerekli değildir. Bir kompresör, sadece basınç oranı, hacimsel akış ve izentropik veya politropik verim ile uygun bir şekilde karakterize edilebilir (Bejan vd. 1995).

Matematiksel bir model, fiziksel bir sistemin işlevlerinin her zaman bir miktar idealleştirmeyi içeren matematiksel ilişkiler açısından bir açıklamasıdır. Matematiksel model, tüm problem değişkenlerinin nasıl ilişkili olduğunu ve bağımsız değişkenlerin performans kriterini nasıl etkilediğini tanımlar. Bir optimizasyon problemi için matematiksel model şunlardan oluşur (Bejan vd. 1995):

- Maksimize edilecek veya minimize edilecek bir amaç fonksiyonu.
- Eşitlik kısıtlamaları.
- Eşitsizlik kısıtlamaları.

Eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamaları, uygun termodinamik ve maliyet modellerinin yanı sıra uygun sınır koşulları ile sağlanır. Bu modeller genellikle her bileşen için malzeme ve enerji dengesi denklemlerini, sıcaklık ve basınçlar için maksimum veya minimum değerler gibi mühendislik tasarımıyla ilgili ilişkileri, her bir bileşenin performansını ve maliyetini ve ayrıca ilgili maddelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini içerir. Modeller

ayrıca, izin verilen çalışma aralıklarını, maksimum veya minimum performans gerekliliklerini ve kaynakların kullanılabilirliğine ilişkin sınırları belirten denklemler ve eşitsizlikler içerir (Bejan vd. 1995).

Alt optimizasyon, özellikle karmaşıklık nedeniyle tüm sistemin optimizasyonunun mümkün olmadığı durumlarda, genellikle karmaşık termal sistemlere uygulanır. Alt optimizasyon, amaç fonksiyonunu veya diğer alt sistemleri etkileyen bazı değişkenlerin göz ardı edilerek gerçekleştirildiği bir problemin veya bir alt sistemin optimizasyonudur. Alt optimizasyon, problem formülasyonu ve mevcut optimizasyon teknikleri problemin tamamının bir çözüme ulaşmaması halinde faydalıdır. Uygulamada, zaman veya insan gücü kısıtlamaları gibi ekonomik ve pratik hususlar nedeniyle bir sistemin alt optimizasyonu da gerekli olabilir. Ancak, tüm alt sistemlerin ayrı ayrı alt optimizasyonu, tüm sistemin optimizasyonunu kesinlikle sağlamaz. Alt optimizasyon için bir alternatif, iteratif optimizasyon yaklaşımıyla sağlanır (Bejan vd. 1995).

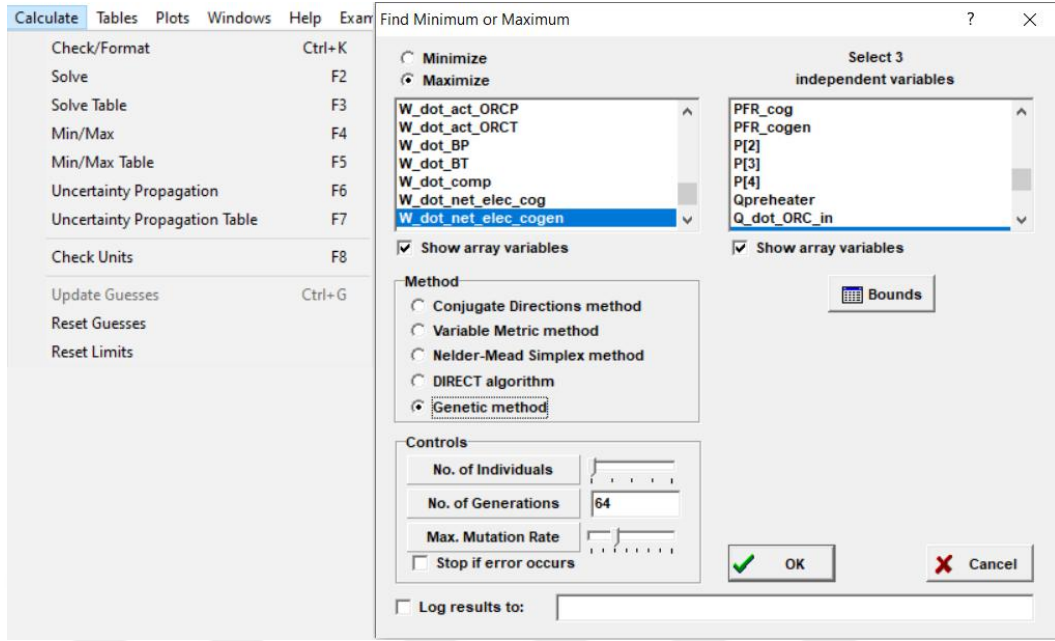
Bu çalışmada, Model 1, birim elektrik maliyetini minimize etmek için, Model 2 birim elektrik, ısıtma ve soğutma maliyetlerini minimize etmek için ve Model 3 ise güç çıktısını maksimize etmek için optimize edilmiştir. Optimizasyon EES yazılımında gerçekleştirilmiş ve detayları burada sunulmuştur.

EES, binlerce birleştirilmiş doğrusal olmayan cebirsel ve diferansiyel denklemleri sayısal olarak çözebilen genel bir denklem çözme programıdır. Program ayrıca diferansiyel ve integral denklemleri çözmek, optimizasyon yapmak, belirsizlik analizleri sağlamak, doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon gerçekleştirmek, birimleri dönüştürmek, birim tutarlılığını kontrol etmek ve grafikler oluşturmak için kullanılabilir. EES'nin önemli bir özelliği, denklem çözme yeteneği ile kullanılmasına izin verecek şekilde yüzlerce madde için sağlanan yüksek doğruluklu termodinamik veri tabanı olmasıdır (İnt. Kyn. 1).

Şekil 5.1'de EES'ye ait Min./Maks. arayüzü verilmiştir. Min./Maks., istenen miktarda bağımsız parametreyi optimize ederek bir amaç fonksiyonunu minimize veya

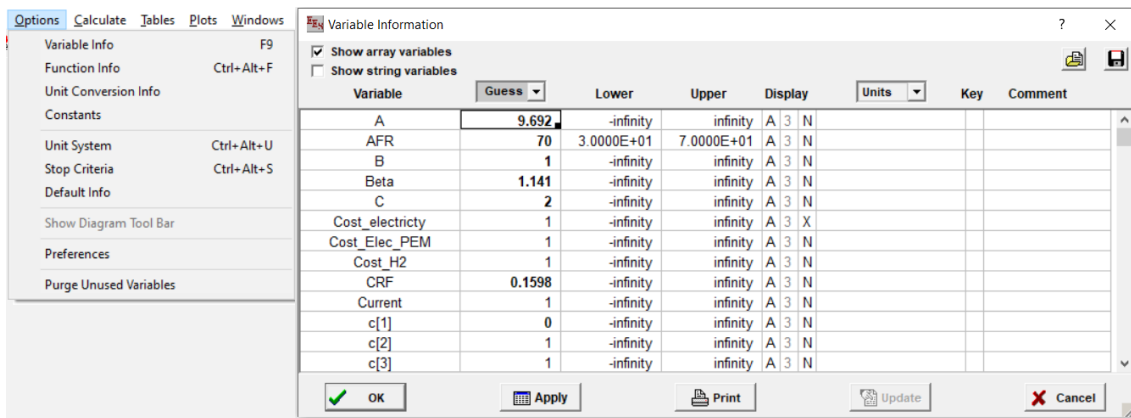
maksimize etmeye yarar. Optimum aranırken değeri/değerleri değışecek bağımsız değışken(ler) sağıdaki listeden seçilir. Seçilmesi gereken bağımsız parametrelerin sayısı sağıdaki listenin üstünde belirtilmiştir. Bir değışkeni seçmek veya seçimi kaldırmak için listedeki adına tıklanır. Listede çok sayıda dizi değışkeni olduğunda, istenen bağımsız değışkenleri bulmayı zorlaştırır. Bu durumda, dizi değışkenlerini göster (Show array variables) kutusunun seçimi kaldırılabilir.

Şekil 5.1’de görülen örnek optimizasyonda 3 bağımsız değışken seçildiğı için yazılım 5 farklı optimizasyon yöntemi sunar. Eğer optimizasyonda tek bağımsız değışken olursa optimizasyon yöntemi “Golden Section search” ve “Quadratic Approximations” yöntemi olmak üzere ikiye düşer. Quadratic Approximations yöntemi daha hızlı olsa da Golden Section search yöntemi daha güvenilirdir. Çok boyutlu optimizasyon, ticari sürümde “Conjugate directions” veya “Variable metric” yöntemleri ile yapılır. Sayısal türevleri kullanan Variable metric yöntemi eğer çalışırsa en verimli yöntem gibi görünmektedir. Conjugate directions yöntemi, optimumun bir sınırda olmak üzere kısıtlandığı veya sayısal türevlerin güvenilir olmadığı problemler için en iyisidir. Profesyonel sürüm, üç ek optimizasyon algoritması sağılar. Bunlar “Nelder – Mead Simplex method, DIRECT algorithm ve Genetic method” yöntemleridir. Genetic yöntem, yerel optimumlar olsa bile global bir optimum bulabilme anlamında en sağlam yöntemdir, ancak aynı zamanda en yavaş olanıdır. DIRECT algorithm yöntemi ayrıca yerel optimumlar mevcut olduğunda global bir optimum bulmak için tasarlanmıştır ve Genetic yöntemden çok daha hızlı olabilir (İnt. Kyn. 1).



Şekil 5.1 Min./Maks. arayüzü.

EES, her bağımsız değişken için sonlu alt (Lower) ve üst (Upper) sınırların belirlenmesini gerektirir. Sınırların dikkatli seçimi ve bağımsız değişkenlerin tahmin değer(ler)i, optimum bulma olasılığını artırır. Sınırlar (Bounds) butonuna basıldığında, seçilen her bağımsız değişken için sınırları görüntülenebilir veya değiştirilebilir ve değeri tahmin edilebilir. Bu, yalnızca seçilen bağımsız değişkenleri içeren “Variable Info” iletişim kutusunun kısaltılmış bir versiyonunu getirecektir. Sınırları ayarlama hakkında ek bilgi için Variable Info komutunun açıklamasına bakılabilir. Şekil 5.2’de Variable Info arayüzü gösterilmiştir (İnt. Kyn. 1).



Şekil 5.2 Variable Info arayüzü.

Genetic yöntem dışındaki tüm yöntemler için, denklemlerin maksimum çözülme sayısı (Max. function calls), bağıl toleransla (Rel. conv. tolerance) birlikte belirtilebilir. Belirlenen tolerans ve izin verilen iterasyon sayısı dahilinde bağımsız değişkenlerin belirtilen değer(ler)i ile denklemler çözülemezse ve “Stop if error occurs” kutucuğu seçili ise EES hesaplamaları durdurur. Birbirini takip eden iki adım arasındaki bağımsız değişken(ler)deki nispi değişim, belirtilen nispi toleranstan daha azsa veya adım sayısı belirtilen maksimum değeri aşıyorsa hesaplamalar durdurulur (İnt. Kyn. 1).

Bu çalışmada optimizasyon metodu olarak Genetic yöntem seçilmiştir. Daha detaylı bahsedilecek olursa yöntem, yerel optimumun varlığında bile global bir optimumu güvenilir bir şekilde bulmak için tasarlanmış sağlam bir optimizasyon algoritmasıdır. Ancak oldukça yavaştır. Bu algoritma, Conjugate directions ve Variable metric yöntemleri başarısız olduğunda ve gerçek optimum noktayı ortaya çıkarmak için hesaplamaları beklemek göze alındığında düşünülmelidir. EES'de uygulanan genetic yöntem, Ulusal Atmosfer Araştırmaları Merkezi'nde (NCAR) Paul Charbonneau ve Barry Knapp tarafından yazılan kamuya açık Pikaia optimizasyon programından (sürüm 1.2, Nisan 2002) türetilmiştir. Genetic optimizasyon algoritmalarının ayrıntılı açıklaması ve Pikaia programının özel detayları sitesinde sunulmaktadır. Bu web sitesinde bulunan bilgiler, EES'de uygulanan genetic optimizasyon yöntemi teorisi hakkında en iyi bilgi kaynağıdır. Bu bölümde verilen bilgiler, Pikaia belgelerinin yerine geçmeyi amaçlamaz, bunun yerine kullanıcıya bu optimizasyon yöntemini etkin bir şekilde kullanması için gerekli bilgileri sağlamayı amaçlar (İnt. Kyn. 1).

Genetic yöntem, biyolojik evrimde meydana gelen süreçleri taklit etmeyi amaçlar. Bir birey popülasyonu (yani örnek noktalar) başlangıçta bağımsız değişkenlerin sınırları tarafından belirtilen aralıktan rastgele seçilir. Bu popülasyondaki bireyler, uygunluklarını belirlemek için araştırılır (yani, minimize veya maksimize edilecek değişkenin değeri tarafından nicelenen amaç fonksiyonunun değerleri). Daha sonra, mevcut popülasyonun seçilen üyelerini 'üretmek' stokastik bir şekilde yeni nesil bireyler üretilir. Bir sonraki nesle aktarılan bir bireyin özellikleri, bağımsız değişkenlerinin kodlanmış değerleri ile temsil edilir. Mevcut popülasyondaki bir bireyin gelecek nesle üremek için seçilme olasılığı, uygunluğunun artan bir fonksiyonudur. 'Üreme', iki

ebeveynin özelliklerini stokastik bir şekilde birleştirir. Ek rastgele varyasyonlar, yavruların ebeveynlerinkinden önemli ölçüde farklı özelliklere sahip olabileceği 'mutasyonlar' olasılığı ile ortaya çıkar. Mevcut uygulamada popülasyondaki birey sayısı her nesil için sabit kalmaktadır (İnt. Kyn. 1).

Genetic yöntemde bir optimumun belirlenmesinden ve bununla ilişkili hesaplama eforundan en çok sorumlu olan üç parametre, bir popülasyondaki birey sayısı (No. of Individuals), keşfedilecek nesil sayısı (No. of Generations) ve maksimum mutasyon oranıdır (Max. Mutation Rate). Bu parametreler, kaydırma çubuğu kontrolleri kullanılarak belirlenebilir. Alternatif olarak, her parametrenin değeri, kaydırma çubuğu kontrolünün solundaki düğmeye tıkladığında görünen düzenleme kutusunda doğrudan belirtilebilir. Her iki seçenekte Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Kaydırma çubuğu kontrollerini kullanarak, birey sayısı 16 (en sol) ile 256 (en sağ) arasında ve nesil sayısı 16 (en sol) ile 2048 (en sağ) arasında değiştirilebilir. Bu kaydırıcı denetimlerin her ikisi için, her onay, parametre değerinde iki faktörlü bir değişiklikle sonuçlanır. Maksimum mutasyon oranı için kaydırma çubuğu aralığı, doğrusal varyasyonla 0.0875 (en sol) ile 0.7 (en sağ) arasındadır. (Düzenleme kutusu parametre girişi kullanılırken, bu parametrelerden herhangi biri için herhangi bir pozitif değer girilebilir.) Maksimum mutasyon oranı için daha büyük değerler, algoritmanın mevcut optimumdan uzak konumlarda bir optimumu daha agresif bir şekilde aramasına neden olur. Daha küçük değerler, aramayı mevcut optimum etrafında daha fazla odaklar. Genetic algoritmada başka parametreler de vardır (örn. minimum mutasyon oranı, kodlanacak önemli rakamların sayısı, vb.). Bunlar ve diğerleri, Pikaia programında önerilen varsayılan değerlere ayarlanmıştır ve EES içinde değiştirilemez (İnt. Kyn. 1).

Conjugate Directions ve Variable Metric yöntemlerinden farklı olarak, Genetic yöntem bağımsız parametrelerin tahmin değerlerinden etkilenmez. Ancak, başlangıç popülasyonu ve sonraki stokastik seçimler sınırlar içerisinde seçildiğinden bağımsız parametreler üzerindeki alt ve üst sınırlar son derece önemlidir. Bu yüzden sınırların seçimi yapılırken dikkatli olunmalıdır. Gerekli fonksiyon değerlendirmelerinin sayısı yaklaşık olarak birey sayısı ile nesil sayısının çarpımına eşittir. Bireylerin ve nesillerin sayısı için kaydırma çubuğu kontrollerinin en sağdaki konumlarına ayarlanması

262000'den fazla fonksiyon değerlendirmesiyle sonuçlanır. Amaç fonksiyonunun karmaşıklığına bağlı olarak, hesaplamaların tamamlanması sonsuza kadar sürebilir. Optimizasyonun ilerlemesi, hesaplamalar sırasında görüntülenir.

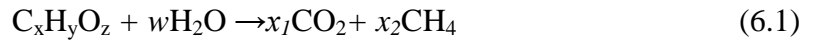


6. AFYON ENERJİ – GÜBRE SANTRALİ ve TASARLANAN MODELLER

6.1 Afyon Enerji – Gübre Santrali

Bu bölümde Afyon Enerji – Gübre Santrali ile ilgili detaylı bilgiler sunulmuştur. Afyon Enerji – Gübre Santrali, 2014 yılında hizmete başlayan 4000 kW kurulu güce sahip bir biyogaz santralidir. Tavuk gübresinden biyogaz ile elektrik üretmekte ve tarım için çok gerekli olan yüksek organik maddeye sahip, hijyenizasyon uygulanmış, zararlı gazlardan arındırılmış, kokusuz, sinek yapmayan, “fermentasyon sonucu elde edilen organik gübrenin” Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı'nın izni ile üretimini ve satışını yapmaktadır. Bir yan ürün olarak amonyaklı suyu da kullanıcıya sunmaktadır. (İnt. Kyn. 2).

Santral 96 ton/gün tavuk gübresi ile biyogaz üretmektedir. Bölgede üretilen tavuk gübresi sırdızmaz kamyonlarla santrale getirilir ve biyokütleyi kabul tanklarına boşaltırlar. Burada biyokütle su ile karıştırılır ve karışım sirkülasyon tankına aktararak karıştırma işlemine burada karıştırıcı ile devam edilir. Karışım tamamlandığında biyokütle ve su çürütme işlemi için biyoreaktöre gönderilir. Reaktörde özel biyolojik bakteriler vasıtasıyla atıklar biyogaza dönüştürülür. Reaktör sızdırmaz yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE (high density poly ethylene) membran ile kaplıdır ve biyogaz bu membran altında toplanır. Reaktörün sıcaklığı, çürütme işlemi için önemlidir ve 35 °C'de sabittir. Sıcaklık düştüğü zaman motordan çıkan egzoz gazı reaktörü ısıtan suyu ısıtır ve sistem kojenere sistem olarak çalışır. Çürütme işlemi ise yaklaşık 30 gün sürmektedir. Biyogazın üretimini gösteren reaksiyon aşağıdaki şekildedir:



Elde edilen biyogaz gaz blower tarafından enerji üretmek üzere gaz çevrimine yönlendirilir. Ancak biyogaz gaz çevrimine gönderilmeden önce birtakım işlemden geçirilir. Biyogazın içerisinde bulunan H₂S, biyolojik temizleme ünitesinde özel sülfür bakterileri ile biyogazdan arındırılır. Çünkü H₂S biyogazla birlikte gaz çevrimine

katıldığında ortamdaki nem ile tepkimeye girerek H_2SO_4 'ü (sülfürik asit) meydana getirir ve bu madde metal yüzeylerde aşınmalara ve paslanmalara sebep olur. Biyotemizleyiciden çıkan kükürt ise organik sıvı ve katı gübreyi kaliteli hale getirir. Ayrıca biyogazda bulunan nemde siklon seperatörde biyogazdan uzaklaştırılır ve biyogaz yanmaya hazır hale gelir (AEG 2016). Resim 6.1'de Afyon Enerji – Gübre Santrali'nin resmi verilmiştir.



Resim 6.1 Afyon Enerji – Gübre Santrali (İnt. Kyn. 2).

Resim 6.2'de santralin lagünü görülmektedir.



Resim 6.2 Lagün (İnt. Kyn. 3).

Resim 6.3'te santralin gaz motorları verilmiştir.



Resim 6.3 Gaz motorları (İnt. Kyn. 4).

Resim 6.4'te gübre işleme görülmektedir.



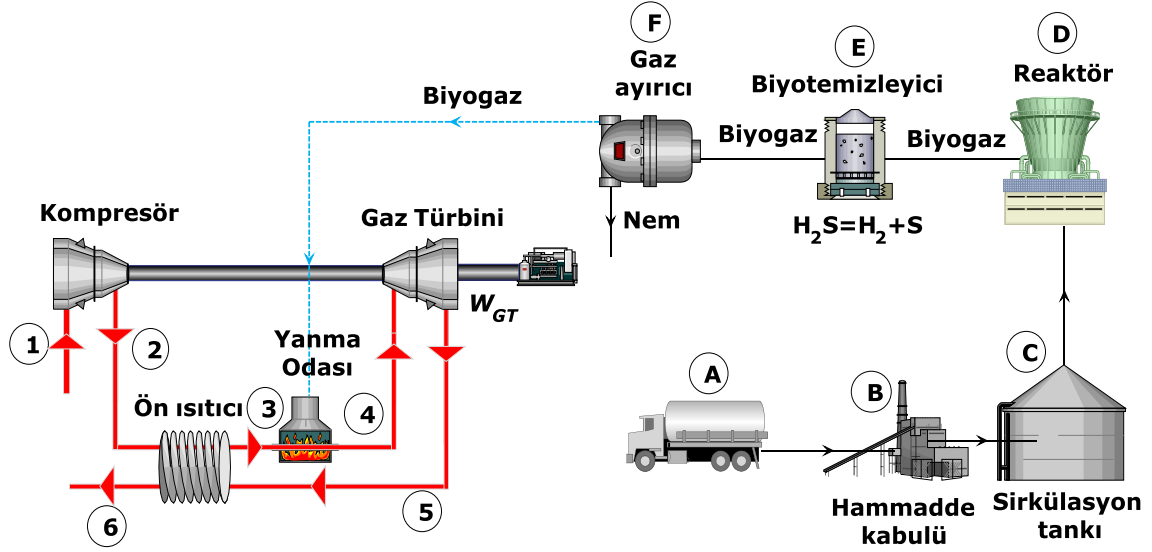
Resim 6.4 Gübre işleme (İnt. Kyn. 2).

Resim 6.5'de hammadde kabulü görülmektedir.



Resim 6.5 Hammadde kabulü (İnt. Kyn. 2).

Gaz çevrimi, biyokütleden elde edilen biyogaz ile santralin elektrik üretimini yaptığı ünedir. Brayton çevrimine göre çalışır ve bu santralde egzoz gazı enerjisinden faydalanarak verimi artırmak amacıyla ön ısıtmalı (rejenerasyonlu) bir gaz çevrimi mevcuttur. Şekil 6.1’de mevcut santralin şematik resmi görülmektedir. Çevrimin ana elemanları kompresör, ön ısıtıcı, yanma odası ve türbindir. Atmosferik hava, türbinde üretilen güç ile çalışan kompresör tarafından sıkıştırılır. Sıcaklık ve basıncı yükselen hava, ön ısıtıcıda yanma öncesinde egzoz gazı enerjisiyle bir miktar ısıtılır. Hava yüksek basınç ve sıcaklıkta biyogaz ile reaksiyona girer ve yüksek enerjili egzoz gazı açığa çıkarır. Yanma odasını terk eden egzoz gazları gaz çevrimi türbinini çalıştırır ve güç üretilir. Üretilen gücün bir kısmı kompresörü çalıştırmaya harcanırken kalanı jeneratörde elektriğe dönüştürülür. Türbin ve ön ısıtmada değerlendirilen egzoz gazı halen yüksek enerjiye sahip şekilde atmosfere salınır. Bu noktada, hem gaz çevrimini optimize etmek hem de yüksek enerji ile atmosfere salınan egzoz gazından faydalanmak, santrali daha verimli hale getirir, ürün maliyetlerini düşürür, elektrik – ısıtma – soğutma – hidrojen üretimi gibi çeşitli ihtiyaçları karşılar ve çevreye çok daha az zararlı egzoz gazı salınır. Bu amaçlarla bu tez çalışmasında üç farklı model geliştirilmiş ve bu bölümde sunulmuştur.



Şekil 6.1 Mevcut santralin şematik görünümü.

6.2 Tasarlanan Modellerin Termodinamik Tanımları ve Çalışma Prensipleri

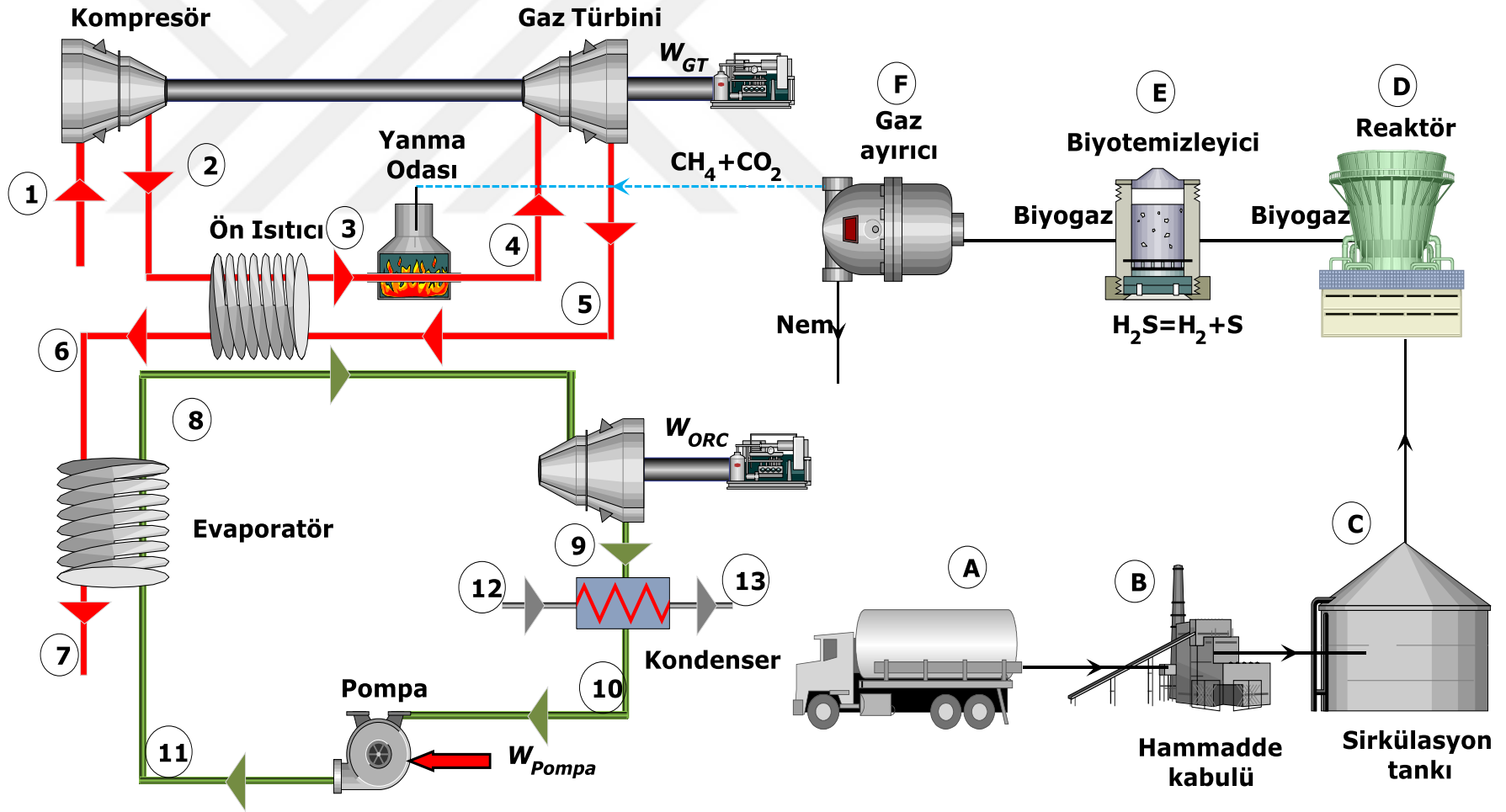
6.2.1 Model 1'in Termodinamik Tanıtımı ve Çalışma Prensipleri

Model 1, santralin mevcut gaz çevrimi ile bir ORC ünitesinden oluşur. Model enerji kaynağı olarak %60 metan – %40 karbon dioksit karışımı biyogaz kullanmaktadır. Termoekonomik açıdan optimize edilen modelde optimizasyonun amacı yakıt tüketimini düşürmek ve elektriği daha ucuza üretmektir. 4000 kW net çıkış elektrik gücünü artırmak amaçlanmamış, aynı gücü daha az yakıt tüketimiyle daha verimli şekilde elde etmek amaçlanmıştır.

CHP veya kojenerasyon sistemleri, biyogazı güce dönüştürmek için kullanılan en yaygın sistemlerdir (Yağlı vd. 2016). Birçok uygulamada elektrik ve ısı genellikle ayrı ayrı üretilirken, kojenerasyon sistemlerinde eş zamanlı olarak üretilir. Bu nedenle kojenerasyon sistemlerinin mantığı, bir güç üretim sisteminin atık ısını kullanarak ve faydalı işe dönüştürerek performansı artırmaktır. ORC, atık ısıyı geri kazanarak verimi artırabilir. Basitliği, yüksek güvenilirliği ve ekonomik avantajları nedeniyle düşük sıcaklıkta atık ısı geri kazanımı için umut verici bir yöntemdir. Harici yakıt tüketimi gerektirmeden atık ısı geri kazanımı sağladığı için çevreyi kirleten gazlar azaltır. Geleneksel Rankine çevrimi ile karşılaştırıldığında ORC, atık ısının geri kazanılmasında

birçok avantaja sahiptir. ORC'nin çalışma akışkanları organik bazlıdır ve daha düşük kaynama sıcaklığına sahiptir. Bu nedenle, ORC'nin termal verimi ve güç üretim kapasitesi, düşük sıcaklıklı atık ısı kaynakları için Rankine çevriminden daha yüksektir. Bir ORC sisteminin yatırım maliyeti genellikle 1200 – 9500 \$/kW aralığındadır. Ancak sistemin amacı, ORC mimarisi ve kaynak türü gerçek yatırım değerini önemli ölçüde etkiler (Pan vd. 2020, Dumont vd. 2018).

Şekil 6.2'de Model 1'in şematik görünümü ve çalışma prensibi verilmiştir. Modelin biyogaz üretim ve gaz çevrimi üniteleri mevcut santral ile aynı mantıkta çalışır. Mevcut santralde 6 durumunda atmosfere salınan egzoz gazı Model 1'de bir evaporatörden geçirilir. ORC ünitesinin çalışma akışkanına enerjisinin bir kısmını transfer eder ve daha sonra atmosfere salınır. ORC ünitesinde sirküle edilen akışkan evaporatörde ORC yüksek basıncında buharlaşır ve ORC türbininde güç üretir. Üretilen güç jeneratörde elektriğe dönüştürülür. Türbinden çıkan akışkanın basıncı ve sıcaklığı düşer ve buhar halde kondensere gelir ve soğutulur. Burada sıvı hale geçen akışkan pompa ile yeniden yüksek basınca ulaşır ve evaporatörde egzoz gazı enerjisini üzerine alır.



Şekil 6.2 Model 1'in şematik görünümü ve çalışma prensibi.

ORC ünitesinin performansını en çok etkileyen iki parametre ORC düşük ve yüksek basınçları ile ORC çalışma akışkanının hangi akışkan olduğudur. Literatürde ORC için en çok kullanılan akışkanlardan beş tanesi, toluen – sikloheksan – n pentan – izopentan – R245fa, bu çalışmada test edilmiştir. Çizelge 6.1’de ORC ünitesinde test edilen akışkanların özellikleri verilmiştir.

Çizelge 6.1 ORC ünitesinde test edilen akışkanların özellikleri (İnt. Kyn. 5, İnt. Kyn. 6, İnt. Kyn. 7, İnt. Kyn. 8, İnt. Kyn. 9, İnt. Kyn. 10).

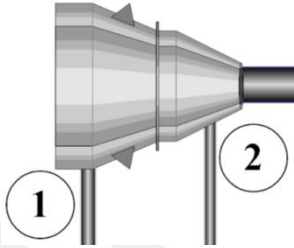
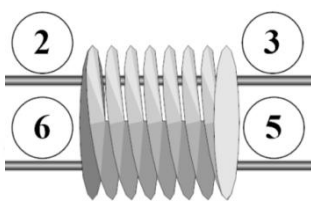
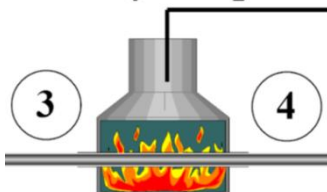
Akışkanlar	$T_{kritik}(K)$	$P_{kritik}(MPa)$	ASHRAE 34	ODP	Yanabilirlik	GWP
Toluen	591.79	4.109	B3	0	Yanıcı	-
Sikloheksan	553.58	4.1	A1	0	Yanıcı	Düşük
n – pentan	469.8	3.36	A3	0	Yanıcı	Düşük
İzopentan	460.35	3.378	A3	0	Yanıcı	Düşük
R245fa	427.01	3.651	B1	0	Yanıcı değil	950

ORC ünitesinin en iyi performansı gösteren akışkanını bulmak için her akışkan kendi çalışılabilir sınırları içerisinde değerlendirilmiştir. Her akışkan için ORC düşük basıncı, akışkanın pompaya gelmeden önce buharlaşma yapmasını engellemek amacıyla çevre sıcaklığının 5 K üzerindeki sıcaklığa karşılık gelen akışkan doyma basıncı olarak seçilmiştir (Gark vd. 2013). Yüksek basınç ise akışkanların kritik basınca ulaşma riskini engellemek amacıyla toluen hariç kritik basınçlarının 0.9 katı olarak seçilmiştir. Toluen Çizelge 6.1’de görüldüğü gibi diğer akışkanlardan daha yüksek bir kritik basınç ve sıcaklığa sahiptir. Kritik basıncının 0.9 katına karşılık gelen sıcaklık ORC’yi tahrik eden 6 durumundaki egzoz gazından daha yüksek bir sıcaklığa karşılık gelir. Bu durumda egzoz gazı ORC’ye ısı transfer ettiğinde toluen buharlaşmamış olur. Bunun önüne geçmek için toluenin yüksek basıncı kritik basıncının 0.35 katı olarak seçilmiştir. Yapılan termoeconomik optimizasyon için seçilen bağımsız değişkenler ve uygulanabilir çalışma aralıkları şu şekildedir:

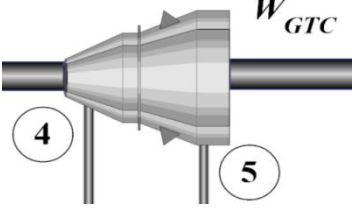
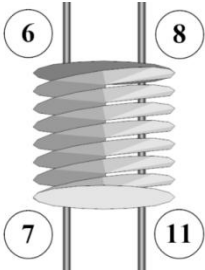
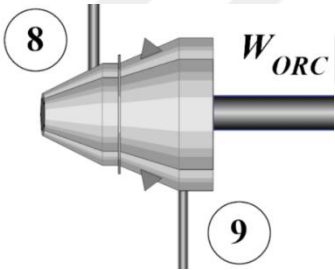
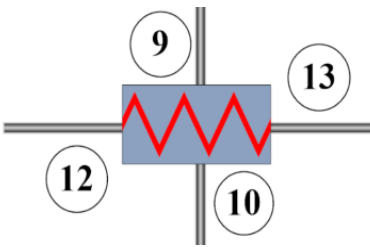
- $60 \leq HYO$ (Hava yakıt oranı) ≤ 80
- $6 \leq$ sıkıştırma oranı ≤ 15
- $1 \text{ kPa} \leq$ ORC düşük basıncı $\leq 1000 \text{ kPa}$
- $1000 \text{ kPa} \leq$ ORC yüksek basıncı $\leq 4500 \text{ kPa}$ ve $P_{kritik} \times 0.9$

Model 1'in bileşen ve kojenerer sistem düzeyinde enerji, ekserjetik ve debi analizi için kullanılan termodinamik eşitlikler Çizelge 6.2'de verilmiştir.

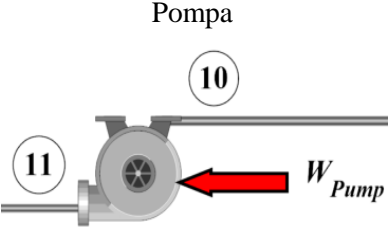
Çizelge 6.2 Model 1 için bileşen ve kojenerer sistem düzeyinde enerji, ekserji ve debi analizi için kullanılan termodinamik eşitlikler.

Ekipman	Eşitlik
<p>Kompresör</p> 	$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 = \dot{m}_{hava}$ $\eta_{izen.,komp.} = \frac{h_{s2} - h_1}{h_2 - h_1}$ $\dot{W}_{komp.} = \dot{m}_1(h_2 - h_1)$ $\dot{W}_{tr,komp.} = \dot{m}_1(ex_2 - ex_1)$ $\dot{E}x_{Yok.,komp.} = \dot{W}_{komp.} - \dot{W}_{tr,komp.}$
<p>Ön Isıtıcı</p> 	$\dot{m}_3 = \dot{m}_2$ $\dot{m}_6 = \dot{m}_5$ $\eta_{enerji,öt.} = \frac{h_3 - h_2}{h_5 - h_2}$ $\dot{E}x_{F,öt.} = \dot{m}_5(ex_5 - ex_6)$ $\dot{E}x_{P,öt.} = \dot{m}_2(ex_3 - ex_2)$ $\dot{E}x_{Yok.,öt.} = \dot{E}x_{F,öt.} - \dot{E}x_{P,öt.}$
<p>Yanma Odası (YO)</p> <p>$CH_4 - CO_2$</p> 	$\dot{m}_3 + \dot{m}_{biyogaz} = \dot{m}_4$ $(\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{biyogaz} HV_{biyogaz}) \eta_{enerji,YO} = \dot{m}_4 h_4$ $\dot{E}x_{F,YO} = \dot{m}_{biyogaz} ex_{kim,biyogaz} + \dot{m}_3 ex_3$ $\dot{E}x_{P,YO} = \dot{m}_4 ex_4$ $\dot{E}x_{Yok.,YO} = \dot{E}x_{F,YO} - \dot{E}x_{P,YO}$

Çizelge 6.2 (Devam) Model 1 için bileşen ve kojenerer sistem düzeyinde enerji, ekserji ve debi analizi için kullanılan termodinamik eşitlikler.

<p>Gaz Çevrimi Türbini</p> 	$\dot{m}_5 = \dot{m}_4$ $\eta_{izen.,türb.,GÇ} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5s}}$ $\dot{W}_{türb.,GÇ} = \dot{m}_4(h_4 - h_5)$ $\dot{W}_{tr.,türb.,GÇ} = \dot{m}_4(ex_4 - ex_5)$ $\dot{E}x_{Yok.,türb.,GÇ} = \dot{W}_{tr.,türb.,GÇ} - \dot{W}_{türb.,GÇ}$
<p>Evaporatör</p> 	$\dot{m}_7 = \dot{m}_6$ $\dot{m}_8 = \dot{m}_{11}$ $\dot{m}_6(h_6 - h_7) = \dot{m}_{11}(h_8 - h_{11})$ $\dot{E}x_{F, evap.} = \dot{m}_6(ex_6 - ex_7)$ $\dot{E}x_{P, evap.} = \dot{m}_{11}(ex_8 - ex_{11})$ $\dot{E}x_{Yok., evap.} = \dot{E}x_{F, evap.} - \dot{E}x_{P, evap.}$
<p>ORC Türbini</p> 	$\dot{m}_9 = \dot{m}_8$ $\eta_{izen.,türb.,ORC} = \frac{h_8 - h_9}{h_8 - h_{9s}}$ $\dot{W}_{türb.,ORC} = \dot{m}_8(h_8 - h_9)$ $\dot{W}_{tr.,türb.,ORC} = \dot{m}_8(ex_8 - ex_9)$ $\dot{E}x_{Yok.,türb.,ORC} = \dot{W}_{tr.,türb.,ORC} - \dot{W}_{türb.,ORC}$
<p>Kondenser</p> 	$\dot{m}_{10} = \dot{m}_9$ $\dot{m}_{13} = \dot{m}_{12} = \dot{m}_{su}$ $\dot{m}_9(h_9 - h_{10}) = \dot{m}_{12}(h_{13} - h_{12})$ $\dot{E}x_{F, kond.} = \dot{m}_9(ex_9 - ex_{10})$ $\dot{E}x_{P, kond.} = \dot{m}_{12}(ex_{13} - ex_{12})$ $\dot{E}x_{Yok., kond.} = \dot{E}x_{F, kond.} - \dot{E}x_{P, kond.}$

Çizelge 6.2 (Devam) Model 1 için bileşen ve kojenerer sistem düzeyinde enerji, ekserji ve debi analizi için kullanılan termodinamik eşitlikler.

	$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{10}$ $\dot{W}_{pompa} = \dot{m}_{10} \frac{v_{10}(P_{11} - P_{10})}{\eta_{izen.,pompa}}$ $\dot{W}_{pompa} = \dot{m}_{10}(h_{11} - h_{10})$ $\dot{W}_{tr.,pompa} = \dot{m}_{10}(ex_{11} - ex_{10})$ $\dot{E}x_{Yok.,pompa} = \dot{W}_{pompa} - \dot{W}_{tr.,pompa}$
Fiziksel Ekserji	$ex_{fiz,n} = h_n - h_0 - T_0(s_n - s_0)$ $\dot{E}x_{fiz,n} = \dot{m}_n ex_{fiz,n}$
Kimyasal Ekserji	$\dot{E}x_{kim,n} = \sum_{k=1} x_k ex_{kim,k} + \bar{R}T_0 \left(\sum_{k=1} x_k \ln x_k \right)$
Toplam Ekserji	$\dot{E}x_n = \dot{E}x_{fiz,n} + \dot{E}x_{kim,n}$
Enerji Verimi (η_{enerji})	$\eta_{enerji,G\check{C}} = \frac{\dot{W}_{net,G\check{C}}}{\dot{m}_{biyogaz} HV_{biyogaz}}$ $\eta_{enerji,ORC} = \frac{\dot{W}_{net,ORC}}{\dot{m}_{11}(h_8 - h_{11})}$ $\eta_{enerji,kojen.} = \frac{\dot{W}_{net,G\check{C}} + \dot{W}_{net,ORC}}{\dot{m}_{biyogaz} HV_{biyogaz}}$
Ekserji Verimi ($\eta_{ekserji}$)	$\eta_{ekserji,G\check{C}} = \frac{\dot{W}_{net,G\check{C}}}{\dot{E}x_{kim.,biyogaz}}$ $\eta_{ekserji,ORC} = \frac{\dot{W}_{net,ORC}}{\dot{m}_8(ex_8 - ex_{11})}$ $\eta_{ekserji,kojen.} = \frac{\dot{W}_{net,G\check{C}} + \dot{W}_{net,ORC}}{\dot{E}x_{kim.,biyogaz}}$

6.2.2 Model 2'nin Termodinamik Tanıtımı ve Çalışma Prensibi

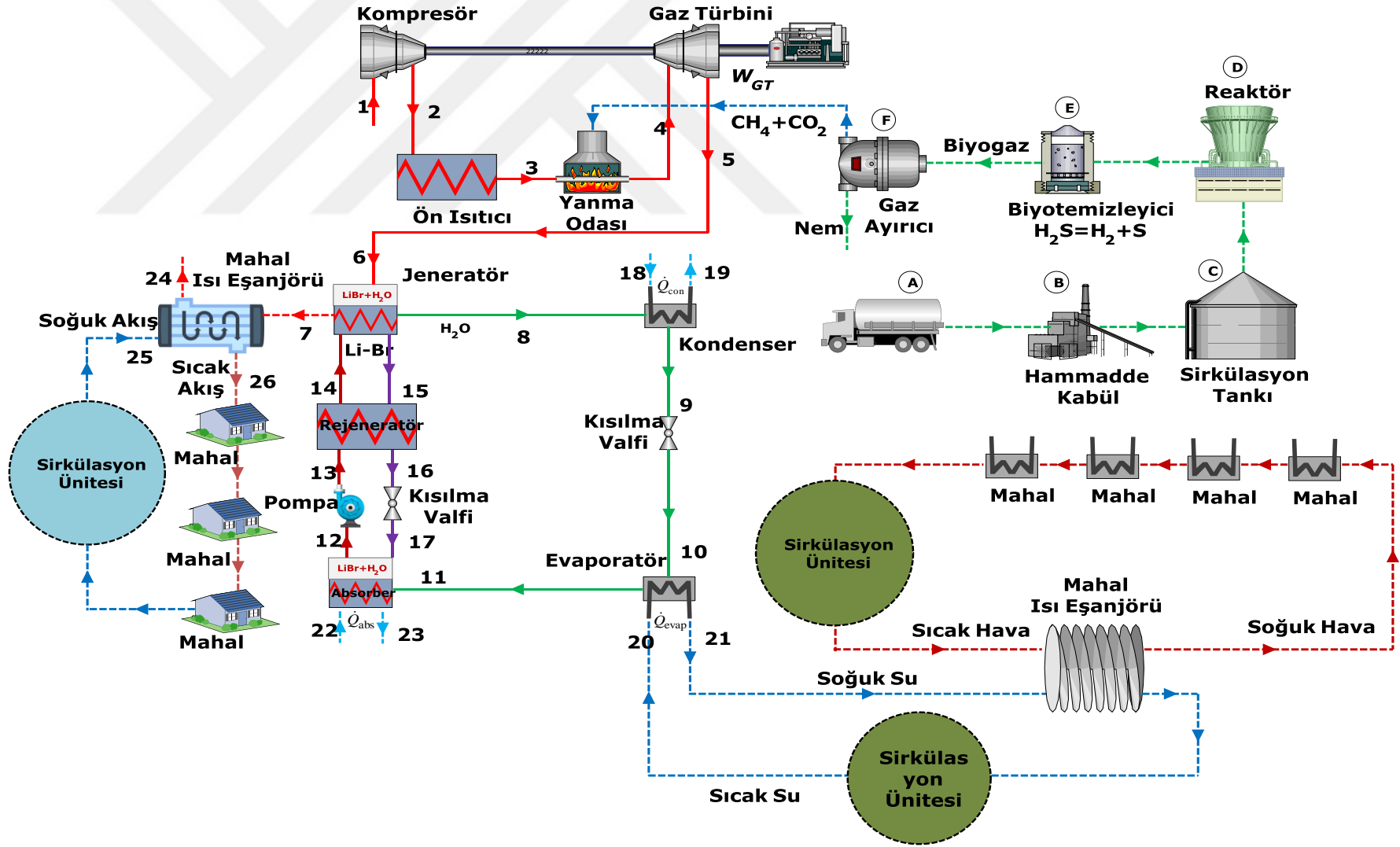
Model 2, santralin mevcut gaz çevrimi ile birer ısıtma ve soğutma ünitesinden oluşur. Model enerji kaynağı olarak %60 metan – %40 karbon dioksit karışımı biyogaz kullanmaktadır. Termoeconomik açıdan optimize edilen modelde optimizasyonun amacı yakıt tüketimini ve birim maliyetleri düşürmektir. Model 1 ile benzer şekilde gaz çevriminin 4000 kW sabit çıkış gücünün artırılması yerine, aynı gücün daha düşük yakıt tüketimi ile verimli şekilde elde edilmesi amaçlanmıştır.

CCHP olarak adlandırılan soğutma, ısıtma ve elektrik üretim (trijenerasyon) sistemleri, soğutma, ısıtma ve güç gibi farklı enerji türlerini sağlamakta ve toplam verimleri %70 ile %85 arasında değişmektedir (Norani ve Deymi – Dashtebayaz 2022). Egzoz gazı sadece ısıtma için kullanılmaz; aynı zamanda bulunabilirliği ve teknolojik olgunluğu nedeniyle en popüler seçim olan LiBr absorpsiyonlu soğutma sisteminde soğutma için kullanılır. Ev ve endüstriyel kullanımda CCHP sistemleri, daha yüksek enerji veriminde önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca bu santraller, geleneksel sistemlere göre daha düşük emisyon ve enerji tüketimine sahiptir (Cao vd. 2021, Wegener vd. 2021, Ghamari vd. 2021). CCHP sistemleri tasarlanırken birçok teknoloji göz önünde bulundurulur. Yüksek performanslı yakıt hücresinin elektriği dallandırma ve dağıtma yeteneği, sessiz çalışması ve çevre dostu olması, onu CCHP sistemlerinde elektrik üretimi için ideal teknolojiler arasında yer almasını sağlar (Wei vd. 2021). Ancak, küçük ölçekli çözümler arasında, geniş kullanılabilirlikleri, teknolojik olgunluğu ve yük esnekliği nedeniyle içten yanmalı motorlar tercih edilmektedir. Ayrıca farklı alt sistemleri içeren CCHP sistemi çok fazla ekipman ve dolayısıyla sermaye gerektirir. Bununla birlikte, biyokütle bazlı ve küçük ölçekli bir CCHP sistemi kendi kendine yeterliliği artırır ve ekolojik ayak izini azaltır. Ayrıca uygun ekipman seçimi ve optimum boyutlandırma ile uzun vadeli ekonomik faydalar sağlar (Wegener vd. 2021).

Model 2'de soğutma sistemi olarak mekanik kompresörlü soğutma sistemi yerine absorpsiyonlu soğutma sistemi tercih edilmiştir. Elektrikle çalışan bir kompresörlü çalışma prensibine benzer şekilde, çalışma akışkanının düşük basınç ve sıcaklık altında genişlemesiyle soğutma üretir. Mekanik bir sıkıştırma sisteminde, soğutucu akışkan

düşük basınçta buharlaşarak soğutma üretir. Daha sonra mekanik bir kompresörde yüksek bir basınca sıkıştırılır ve bir kondenserde yoğunlaştırılır. Çoğu soğutma ünitesinde kompresör bir elektrik motoruyla çalıştırılır. Absorpsiyonlu soğutucular ise ısıtıldığında çözeltildeki çalışma akışkanının ayrılması prensibine göre çalışır. Pompa, kompresörden çok daha az elektrik gerektirir ve bu nedenle absorpsiyonlu soğutma sistemleri de bilimsel ilgi konusudur. Jeneratör sıcaklığı 76 – 99 °C ise LiBr – H₂O ve 95 – 120 °C ise NH₃ – H₂O olmak üzere iki tip çalışma akışkanı kullanılır. Orta sıcaklık, enerji ve ekserji performansı ile eksergoekonomik parametreler üzerinde eşzamanlı olumlu etkilere sahiptir. Bu çalışmada jeneratör sıcaklığı 93 °C olduğundan çalışma akışkanı olarak LiBr – H₂O seçilmiştir. Ayrıca çalışma akışkanını daha verimli hareket ettirmek ve sistemdeki basınç değişimini sağlamak için pompa tercih edilmiştir (Norani ve Deymi – Dashtebayaz 2022, Imamović vd. 2022).

Model 2'nin şematik görünümü ve çalışma prensibi Şekil 6.3'te verilmiştir. Modelin biyogaz üretim ve gaz çevrimi üniteleri mevcut santral ile aynı mantıkta çalışır. Atık egzoz gazı atmosfere atılmak yerine soğutma çevriminin jeneratörüne gelir ve LiBr absorpsiyonlu soğutma sistemini çalıştırır. Jeneratörden sonra LiBr, ısı ile H₂O'dan ayrılır. Isınan su, kondenserde sabit basınçta soğutulur ve genişleme valfinde genişir. Evaporatörde mahal soğutma suyunu soğutarak soğutma işlemini gerçekleştirir. Bu sırada LiBr, enerjisinin bir kısmını rejeneratörden geçerek LiBr – H₂O çözeltilisine aktarır. Daha sonra genişleme valfinde genişir ve ısıtılan su ile absorberde yeniden karışım oluşturur. Absorpsiyon sürecini daha verimli hale getirmek için çözeltili absorberde soğutulur. Soğutma çevrimi pompası, LiBr – H₂O çözeltilisini rejeneratör boyunca jeneratöre pompalar ve çevrim tamamlanır. Bu sayede soğutulan mahalden evaporatöre gelen sıcak su, soğutma için sirküle edilir. Öte yandan egzoz gazı, enerjisinin bir kısmı soğutma ünitesine transfer etmiş olmasına rağmen hala yüksek enerjiye sahiptir. Bu nedenle jeneratörden sonra, mahal ısı eşanjöründeki suyu ısıttıktan sonra atmosfere salınır. Isıtma çevriminin çalışma akışkanı olan su, ısıtılan mahal ile eşanjör arasında sirküle ettirilir.



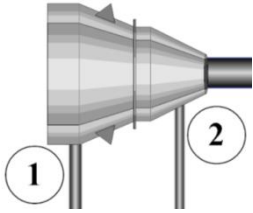
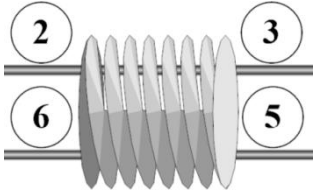
Şekil 6.3 Model 2'nin şematik görünümü ve çalışma prensibi.

Model 2’de santral performansını etkileyen parametreler HYO, sıkıştırma oranı, soğutma sistemi yüksek ve düşük basıncı olarak sıralanabilir. Bu parametrelerin optimizasyonu içinde buldukları ünitenin ürün maliyetini düşürmeyi amaçlamaktadır. Optimizasyon parametrelerinin uygulanabilir çalışma aralıkları şu şekildedir:

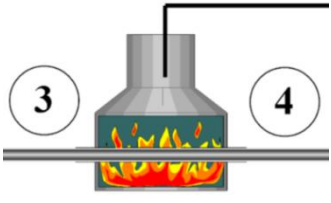
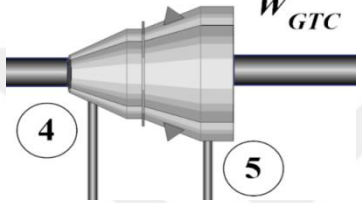
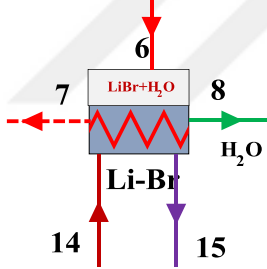
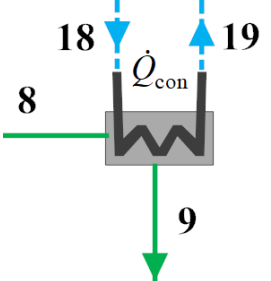
- $60 \leq \text{HYO} \leq 80$
- $6 \leq \text{sıkıştırma oranı} \leq 15$
- $0.7 \text{ kPa} \leq \text{Soğutma ünitesi düşük basıncı} \leq 1 \text{ kPa}$
- $7 \text{ kPa} \leq \text{Soğutma ünitesi yüksek basıncı} \leq 10 \text{ kPa}$

Model 2’nin bileşen ve kojenerer sistem düzeyinde enerji, ekserjetik ve debi analizi için kullanılan termodinamik eşitlikler Çizelge 6.3’te verilmiştir.

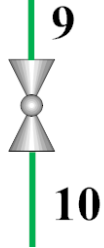
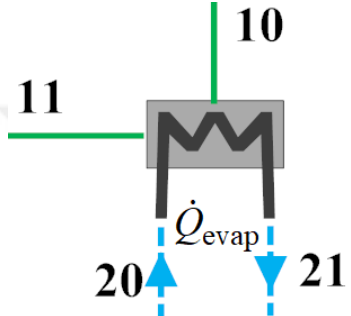
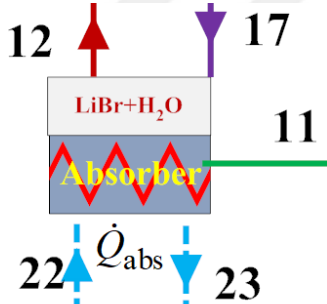
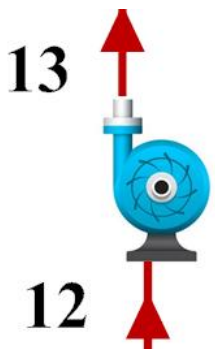
Çizelge 6.3 Model 2 için bileşen ve CCHP sistem düzeyinde enerji, ekserji ve debi analizi için kullanılan termodinamik eşitlikler.

Ekipman	Eşitlik
<p>Kompresör</p> 	$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 = \dot{m}_{\text{hava}}$ $\eta_{\text{izen.,komp.}} = \frac{h_{s2} - h_1}{h_2 - h_1}$ $\dot{W}_{\text{komp.}} = \dot{m}_1 (h_2 - h_1)$ $\dot{W}_{\text{tr.,komp.}} = \dot{m}_1 (ex_2 - ex_1)$ $\dot{E}x_{\text{Yok.,komp.}} = \dot{W}_{\text{komp.}} - \dot{W}_{\text{tr.,komp.}}$
<p>Ön Isıtıcı</p> 	$\dot{m}_3 = \dot{m}_2$ $\dot{m}_6 = \dot{m}_5$ $\eta_{\text{enerji,öl.}} = \frac{h_3 - h_2}{h_5 - h_2}$ $\dot{E}x_{F,\text{öl.}} = \dot{m}_5 (ex_5 - ex_6)$ $\dot{E}x_{P,\text{öl.}} = \dot{m}_2 (ex_3 - ex_2)$ $\dot{E}x_{\text{Yok.,öl.}} = \dot{E}x_{F,\text{öl.}} - \dot{E}x_{P,\text{öl.}}$

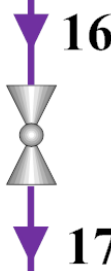
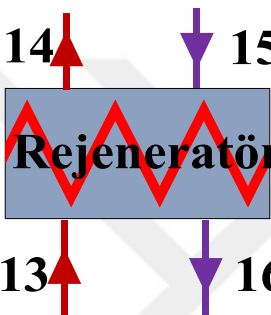
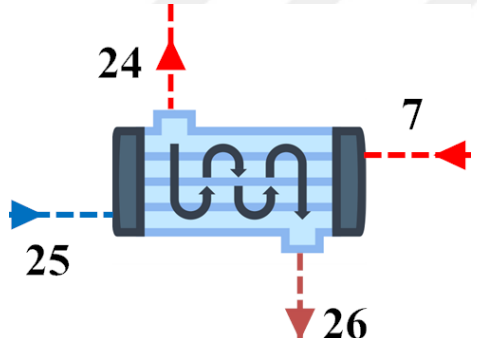
Çizelge 6.3 (Devam) Model 2 için bileşen ve CCHP sistem düzeyinde enerji, ekserji ve debi analizi için kullanılan termodinamik eşitlikler.

<p>Yanma Odası (YO)</p> 	$\dot{m}_3 + \dot{m}_{biyogaz} = \dot{m}_4$ $(\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{biyogaz} HV_{biyogaz}) \eta_{enerji, YO} = \dot{m}_4 h_4$ $\dot{E}x_{F, YO} = \dot{m}_{biyogaz} ex_{kim., biyogaz} + \dot{m}_3 ex_3$ $\dot{E}x_{P, YO} = \dot{m}_4 ex_4$ $\dot{E}x_{Yok., YO} = \dot{E}x_{F, YO} - \dot{E}x_{P, YO}$
<p>Gaz Çevrimi Türbini</p> 	$\dot{m}_5 = \dot{m}_4$ $\eta_{izen., türb., GÇ} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{s5}}$ $\dot{W}_{türb., GÇ} = \dot{m}_4 (h_4 - h_5)$ $\dot{W}_{tr, türb., GÇ} = \dot{m}_4 (ex_4 - ex_5)$ $\dot{E}x_{Yok., türb., GÇ} = \dot{W}_{tr, türb., GÇ} - \dot{W}_{türb., GÇ}$
<p>Jeneratör</p> 	$\dot{m}_7 = \dot{m}_6$ $\dot{m}_8 + \dot{m}_{15} = \dot{m}_{14}$ $\dot{m}_6 (h_6 - h_7) = \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{15} h_{15} - \dot{m}_{14} h_{14}$ $\dot{E}x_{P, jen.} = \dot{m}_8 ex_8 + \dot{m}_{15} ex_{15} - \dot{m}_{14} ex_{14}$ $\dot{E}x_{F, jen.} = \dot{m}_6 (ex_6 - ex_7)$ $\dot{E}x_{Yok., jen.} = \dot{E}x_{F, jen.} - \dot{E}x_{P, jen.}$
<p>Kondanser</p> 	$\dot{m}_9 = \dot{m}_8$ $\dot{m}_{19} = \dot{m}_{18}$ $\dot{m}_8 (h_8 - h_9) = \dot{m}_{19} (h_{19} - h_{18})$ $\dot{E}x_{P, kond.} = \dot{m}_{18} (ex_{19} - ex_{18})$ $\dot{E}x_{F, kond.} = \dot{m}_8 (ex_8 - ex_9)$ $\dot{E}x_{Yok., kond.} = \dot{E}x_{F, kond.} - \dot{E}x_{P, kond.}$

Çizelge 6.3 (Devam) Model 2 için bileşen ve CCHP sistem düzeyinde enerji, ekserji ve debi analizi için kullanılan termodinamik eşitlikler.

<p>Genleşme Valfi (H₂O)</p> 	$\dot{m}_{10} = \dot{m}_9$ $h_{10} \cong h_9$ $\dot{E}x_{P,gen.val.} = \dot{m}_{10}ex_{10}$ $\dot{E}x_{F,gen.val.} = \dot{m}_9ex_9$ $\dot{E}x_{Yok.,gen.val.} = \dot{E}x_{F,gen.val.} - \dot{E}x_{P,gen.val.}$
<p>Evaporatör</p> 	$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{10}$ $\dot{m}_{21} = \dot{m}_{20}$ $\dot{m}_{10}(h_{11} - h_{10}) = \dot{m}_{20}(h_{20} - h_{21})$ $\dot{E}x_{P,evap.} = \dot{m}_{10}(ex_{11} - ex_{10})$ $\dot{E}x_{F,evap.} = \dot{m}_{20}(ex_{20} - ex_{21})$ $\dot{E}x_{Yok.,evap.} = \dot{E}x_{F,evap.} - \dot{E}x_{P,evap.}$
<p>Absorber</p> 	$\dot{m}_{11} + \dot{m}_{17} = \dot{m}_{12}$ $\dot{m}_{22} = \dot{m}_{23}$ $\dot{m}_{12}h_{12} + \dot{m}_{23}h_{23} = \dot{m}_{11}h_{11} + \dot{m}_{17}h_{17} + \dot{m}_{22}h_{22}$ $\dot{E}x_{P,abs.} = \dot{m}_{23}(ex_{23} - ex_{22})$ $\dot{E}x_{F,abs.} = \dot{m}_{11}ex_{11} + \dot{m}_{17}ex_{17} - \dot{m}_{12}ex_{12}$ $\dot{E}x_{Yok.,abs.} = \dot{E}x_{F,abs.} - \dot{E}x_{P,abs.}$
<p>Pompa</p> 	$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13}$ $h_{12} \cong h_{13}$ $\dot{E}x_{P,pompa} = \dot{W}_{rev.,pompa}$ $\dot{E}x_{F,pompa} = \dot{W}_{pompa}$ $\dot{E}x_{Yok.,pompa} = \dot{E}x_{F,pompa} - \dot{E}x_{P,pompa}$

Çizelge 6.3 (Devam) Model 2 için bileşen ve CCHP sistem düzeyinde enerji, ekserji ve debi analizi için kullanılan termodinamik eşitlikler.

<p>Genleşme Valfi (LiBr)</p> 	$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{17}$ $h_{16} \cong h_{17}$ $\dot{E}x_{P,gen.val.} = \dot{m}_{17}ex_{17}$ $\dot{E}x_{F,gen.val.} = \dot{m}_{16}ex_{16}$ $\dot{E}x_{Yok.,gen.val.} = \dot{E}x_{F,gen.val.} - \dot{E}x_{P,gen.val.}$
<p>Rejeneratör</p> 	$\dot{m}_{14} = \dot{m}_{13}$ $\dot{m}_{16} = \dot{m}_{15}$ $\eta_{enerji, rej.} = \frac{h_{14} - h_{13}}{h_{15} - h_{13}}$ $\dot{E}x_{P, rej.} = \dot{m}_{13}(ex_{14} - ex_{13})$ $\dot{E}x_{F, rej.} = \dot{m}_{15}(ex_{15} - ex_{16})$ $\dot{E}x_{Yok., rej.} = \dot{E}x_{F, rej.} - \dot{E}x_{P, rej.}$
<p>Mahal Isı Eşanjörü (MIE)</p> 	$\dot{m}_{24} = \dot{m}_7$ $\dot{m}_{26} = \dot{m}_{25}$ $\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{25} h_{25} = \dot{m}_{24} h_{24} + \dot{m}_{26} h_{26}$ $\dot{E}x_{P, MIE} = \dot{m}_{25}(ex_{26} - ex_{25})$ $\dot{E}x_{F, MIE} = \dot{m}_7(ex_7 - ex_{24})$ $\dot{E}x_{Yok., MIE} = \dot{E}x_{F, MIE} - \dot{E}x_{P, MIE}$
<p>Enerji Verimi ($\varepsilon_{kullanım}$)</p>	$\varepsilon_{kullanım} = \frac{\dot{Q}_{elek.} + \dot{Q}_{evap.} + \dot{Q}_{MIE.}}{\dot{m}_{biyogaz} HV_{biyogaz}}$

Çizelge 6.3 (Devam) Model 2 için bileşen ve CCHP sistem düzeyinde enerji, ekserji ve debi analizi için kullanılan termodinamik eşitlikler.

$$\eta_{ekserji, CCHP} = \frac{\dot{Q}_{elek.} + \dot{E}x_{Soğ.} + \dot{E}x_{Is.}}{\dot{E}x_{kim,biyogaz}}$$

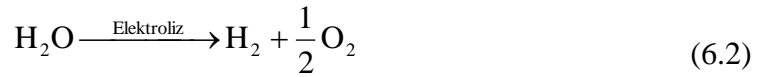
$$\dot{E}x_{So.} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}_{Soğ.,gir.}$$

$$\dot{E}x_{Is.} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}_{Is.,gir.}$$

Ekserji Verimi ($\eta_{ekserji}$)

6.2.3 Model 3'ün Termodinamik Tanıtımı ve Çalışma Prensibi

Model 3, santralin mevcut gaz çevrimi, bir ORC ünitesi ve bir elektroliz ünitesinden oluşur. Model enerji kaynağı olarak %100 metandan oluşan biyogazı kullanmaktadır. Termodinamik açıdan optimize edilen modelde optimizasyonun amacı santralin elektrik üretimini artırmaktır. Model kojenerasyon sistem mantığı ile çalışmaktadır. Modelde toluende dahil olmak üzere ORC yüksek basınçları, çalışma akışkanlarının kritik basınçlarının 0.9 katı olarak belirlenmiştir. Modelde bir elektroliz ünitesi suyun elektrolizi ile hidrojen üretimi yapmaktadır. Elektroliz için ihtiyaç duyduğu gücü ORC ünitesinin ürettiği elektrik ile karşılamaktadır. Elektroliz için gereken termodinamik denklemler aşağıda verilmiştir.



$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_{H_2} + \dot{m}_{O_2} \quad (6.3)$$

$$\Delta h_{H_2O} = (h_{17} - h_{H_2}) + \frac{1}{2} (h_{16} - h_{O_2}) - (h_{15} - h_{H_2O} + h_{f,H_2O}) \quad (6.4)$$

$$\Delta s_{H_2O} = (s_{17} - s_{H_2} + s_{f,H_2}) + \frac{1}{2} (s_{16} - s_{O_2} + s_{f,O_2}) - (s_{15} - s_{H_2O} + s_{f,H_2O}) \quad (6.5)$$

$$\Delta g_{H_2O} = \Delta h_{H_2O} - T_{15} \Delta s_{H_2O} \quad (6.6)$$

olur. tr indisi tersinirliği, $elekt.$ indisi elektrolizi ve MW molar ağırlığı temsil etmek üzere,

$$\dot{W}_{tr, elekt.} = \Delta G_{elekt., su} \quad (6.7)$$

$$\dot{W}_{elekt.} = \frac{\Delta G_{elekt., su}}{\eta_{enerji}} \quad (6.8)$$

$$\dot{W}_{H_2} = \frac{\dot{W}_{elekt.}}{3600.MW_{H_2}} \quad (6.9)$$

$$V' = \frac{\dot{W}_{elekt.}}{2 \times 96500} \quad (6.10)$$

$$V'_{tr} = \frac{\dot{W}_{tr, elekt.}}{2 \times 96500} \quad (6.11)$$

olur. Elektrolizin enerji ve ekserji analizi için şu denklemler gereklidir:

$$\eta_{enerji} = \frac{\dot{m}_{17} \cdot HV}{\dot{W}_{ORC}} \quad (6.12)$$

$$\dot{E}x_{Yok, elekt.} = (\dot{E}x_{15} + \dot{W}_{ORC}) - (\dot{E}x_{16} + \dot{E}x_{17}) \quad (6.13)$$

$$\eta_{ekserji} = \frac{\dot{E}x_{16} + \dot{E}x_{17}}{\dot{E}x_{15} + \dot{W}_{ORC}} \quad (6.14)$$

Şekil 6.4'te Model 3'ün şematik görünümü ve çalışma prensibi verilmiştir. Modelin biyogaz üretim ve gaz çevrimi üniteleri mevcut santral ile aynı mantıkta çalışır. Egzoz gazı atmosfere salınmadan önce hidrojen üretimini artırmak için elektroliz suyunun ön ısıtmasında kullanılır. Hidrojen elektroliz işleminden sonra depolanmak üzere hidrojen tankına gönderilir. Bununla birlikte, biyogazın üretim sürecinde açığa çıkan H₂S bir hidrojen kaynağı olarak kullanılır. H₂S biyotemizleyicide biyolojik bakteriler ile H₂ ve S'e dönüştürülür. S katı ve sıvı gübrenin kalitesini artırdığından gübre üretimine, H₂ ise hidrojen tankına gönderilir.

Yapılan termodinamik optimizasyon için seçilen bağımsız değişkenler ve uygulanabilir çalışma aralıkları şu şekildedir:

- $50 \leq \text{HYO} \leq 70$
- $6 \leq \text{sıkıştırma oranı} \leq 15$
- $750 \text{ K} \leq \text{Ön ısıtıcı sıcaklığı} \leq 825 \text{ K}$
- $1 \text{ kPa} \leq \text{ORC düşük basıncı} \leq 1000 \text{ kPa}$
- $1000 \text{ kPa} \leq \text{ORC yüksek basıncı} \leq 4500 \text{ kPa}$ ve $P_{\text{kritik}} \times 0.9$

6.3 Tasarlanan Modellerin Termoekonomik Analizleri

6.3.1 Model 1'in Termoekonomik Analizi

Termoekonomik bir tanıtımın yapılması için modellerdeki ekipmanlara ve akışkanlara ait tüm maliyetlerin, ekserjetik sonuçlarla birleştirilebilecek birer fonksiyon olarak yazılması gerekir. Model 1'in thermoekonomik analizi için, her bir bileşenin işletme ve bakım maliyetleri, sermaye yatırım maliyetleri, satın alma ve kurulum maliyetleri, birim biyogaz maliyeti ve ORC ünitesi akışkanının birim maliyeti hesaba katılır. Çizelge 6.4'te Model 1 için ekipman satın alma ve kurulum maliyetleri verilmiştir. Toplam Maliyet Oranları EES'de hesaplanmış ve diğer maliyetler Aspen Plus yazılımının güncel ekonomik kütüphanesinden alınmıştır.

Çizelge 6.4 Model 1 için ekipman satın alma ve kurulum maliyetleri (Aspen Plus 2022).

Ekipman	Ekipman Satın Alma Maliyeti (C) (\$)	Ekipman Kurulum Maliyeti (\$)
Kabul Tankı	80 500	152 700
Kurutucu	25 900	163 600
Karıştırıcı	23 100	142 500
Reaktör	23 100	142 500
Ayırıcı	19 500	93 800
Kompresör	8 446 800	439 600
Ön Isıtıcı	17 000	100 900
Yanma Odası	301 200	69 400
GÇ Türbini	5 390 000	181 000
Evaporatör	21 100	126 300
ORC Türbini	204 900	121 700
Kondenser	35 600	101 300
Pompa	19 600	38 500
Toplam	14 608 300	1 873 800

Model 1’de giriş parametreleri olarak kullanılan biyogazın birim ekserjetik maliyeti $c_{biyogaz}=5.5 \times 10^{-6}$ \$/kJ ve ORC ünitesinde kullanılan toluenin birim ekserjetik maliyeti $c_{10}=5.875 \times 10^{-6}$ \$/kJ olarak Aspen Plus yazılımının ekonomik kütüphanesinden elde edilmiştir. Santralde kullanılan hava ve su ücret gerektirmez. Bu durumda $c_1=0$ ve $c_{12}=c_{13}=0$ olarak alınır. Bu doğrultuda aşağıdaki denklemler birim elektrik maliyetini hesaplamak için Model 1’de kullanılan termoekonomik denklemlerdir. Birim elektrik maliyeti hesaplanırken gaz çevrimi ve ORC ünitesinin ürettikleri elektriklerin birim maliyetleri ve elektrik gücü kapasiteleri hesaba katılarak ortalama bir değer alınmıştır. $c_{elek.1}$ gaz çevriminde üretilen, $c_{elek.2}$ ORC ünitesinde üretilen elektriğin birim maliyetidir.

$$c_{elek.1} \dot{W}_{komp.} + c_1 \dot{E}x_1 + \dot{Z}_{komp.} = c_2 \dot{E}x_2 \quad (6.15)$$

$$c_2 \dot{E}x_2 + \dot{Z}_{öl.} + c_5 \dot{E}x_5 = c_3 \dot{E}x_3 + c_6 \dot{E}x_6 \quad (6.16)$$

$$c_3 \dot{E}x_3 + \dot{Z}_{YO.} + c_{biyogaz} \dot{E}x_{biyogaz} = c_4 \dot{E}x_4 \quad (6.17)$$

olur. $c_4=c_5=c_6$ için,

$$c_4\dot{E}x_4 + \dot{Z}_{turb.,G\dot{C}} = c_5\dot{E}x_5 + c_{elek.1}\dot{W}_{turb.,G\dot{C}} \quad (6.18)$$

$$c_6\dot{E}x_6 + c_{11}\dot{E}x_{11} + \dot{Z}_{evap.} = c_7\dot{E}x_7 + c_8\dot{E}x_8 \quad (6.19)$$

olur. $c_8=c_9$ için,

$$c_{10}\dot{E}x_{10} + c_{elek.2}\dot{W}_{Pompa} + \dot{Z}_{Pompa} = c_{11}\dot{E}x_{11} \quad (6.20)$$

$$c_8\dot{E}x_8 + \dot{Z}_{turb.,ORC} = c_9\dot{E}x_9 + c_{elek.2}\dot{W}_{turb.,ORC} \quad (6.21)$$

$$c_9\dot{E}x_9 + \dot{Z}_{kond.} + c_{12}\dot{E}x_{12} = c_{10}\dot{E}x_{10} + c_{13}\dot{E}x_{13} \quad (6.22)$$

$$c_{elek.1}\dot{W}_{turb.,G\dot{C}} + c_{elek.2}\dot{W}_{turb.,ORC} = c_{elek.}(\dot{W}_{turb.,G\dot{C}} + \dot{W}_{turb.,ORC}) \quad (6.23)$$

olur. Son denklemde elde edilen $c_{elek.}$ değeri kojenerer sistemin ürettiği elektriğin birim maliyetini temsil etmektedir.

6.3.2 Model 2'in Termoekonomik Analizi

Çizelge 6.5'te Model 2 için ekipman satın alma ve kurulum maliyetleri verilmiştir. Toplam maliyet oranları EES'de hesaplanmış ve diğer maliyetler Aspen Plus yazılımının güncel ekonomik kütüphanesinden alınmıştır.

Çizelge 6.5 Model 2 için ekipman satın alma ve kurulum maliyetleri (Aspen Plus 2022).

Ekipman	Ekipman Satın Alma Maliyeti (C) (\$)	Ekipman Kurulum Maliyeti (\$)
Kabul Tankı	80 500	152 700
Kurutucu	25 900	163 600
Karıştırıcı	23 100	142 500
Reaktör	23 100	142 500
Ayırıcı	19 500	93 800
Kompresör	8 446 800	439 600
Ön Isıtıcı	17 000	100 900
Yanma Odası	301 200	69 400
GÇ Türbini	5 390 000	181 000
Jeneratör	13 100	79 600
Kondenser	22 100	83 000
Genleşme Valfi (H ₂ O)	8 400	47 700
Evaporatör	96 200	96 200
Absorber	19 400	92 900
Pompa	13 500	4 800
Genleşme Valfi (LiBr)	8 400	47 700
Rejeneratör	34 200	162 700
Isı Eşanjörü	10 700	106 100
Toplam	14 553 100	2 206 700

Model 2’de giriş parametreleri olarak kullanılan biyogazın birim ekserjetik maliyeti $c_{biyogaz}=5.5 \times 10^{-6}$ \$/kJ ve soğutma ünitesinde kullanılan LiBr’nin birim ekserjetik maliyeti $c_{12}=5.8 \times 10^{-6}$ \$/kJ olarak Aspen Plus yazılımının ekonomik kütüphanesinden elde edilmiştir. Santralde kullanılan hava ve su ücret gerektirmez. Bu durumda $c_1=0$ alınır. Bu doğrultuda aşağıdaki denklemler birim elektrik, soğutma ve ısıtma maliyetini hesaplamak için Model 2’de kullanılan termoekonomik denklemlerdir. c_{elek} , c_{21} ve c_{26} sırasıyla elektrik, soğutma ve ısıtma birim maliyetlerini temsil etmektedir:

$$c_{elek} \dot{W}_{komp.} + c_1 \dot{E}x_1 + \dot{Z}_{komp.} = c_2 \dot{E}x_2 \quad (6.24)$$

$$c_2 \dot{E}x_2 + \dot{Z}_{öl.} + c_5 \dot{E}x_5 = c_3 \dot{E}x_3 + c_6 \dot{E}x_6 \quad (6.25)$$

$$c_3 \dot{E}x_3 + \dot{Z}_{YO.} + c_{biyogaz} \dot{E}x_{biyogaz} = c_4 \dot{E}x_4 \quad (6.26)$$

olur. $c_4=c_5=c_6$ için,

$$c_4 \dot{E}x_4 + \dot{Z}_{türb.,GÇ} = c_5 \dot{E}x_5 + c_{elek.} \dot{W}_{türb.,GÇ} \quad (6.27)$$

olur. $c_7=0$ için,

$$c_6 \dot{E}x_6 + c_{14} \dot{E}x_{14} + \dot{Z}_{jen.} = c_7 \dot{E}x_7 + c_8 \dot{E}x_8 + c_{15} \dot{E}x_{15} \quad (6.28)$$

olur. $c_8=c_9$ ve $c_{18}=0$ için,

$$c_8 \dot{E}x_8 + c_{18} \dot{E}x_{18} + \dot{Z}_{kond.} = c_9 \dot{E}x_9 + c_{19} \dot{E}x_{19} \quad (6.29)$$

$$c_9 \dot{E}x_9 + \dot{Z}_{gen.val.} = c_{10} \dot{E}x_{10} \quad (6.30)$$

olur. $c_{20}=c_{22}=0$ ve $c_{11}=c_{17}$ için,

$$c_{10} \dot{E}x_{10} + c_{20} \dot{E}x_{20} + \dot{Z}_{evap.} = c_{11} \dot{E}x_{11} + c_{21} \dot{E}x_{21} \quad (6.31)$$

$$c_{11} \dot{E}x_{11} + c_{17} \dot{E}x_{17} + c_{22} \dot{E}x_{22} + \dot{Z}_{abs.} = c_{12} \dot{E}x_{12} + c_{23} \dot{E}x_{23} \quad (6.32)$$

olur. $c_{13}=c_{14}$ ve $c_{15}=c_{16}$ için,

$$c_{12} \dot{E}x_{12} + c_{elek.} \dot{W}_{pompa} + \dot{Z}_{pompa} = c_{13} \dot{E}x_{13} \quad (6.33)$$

$$c_{13} \dot{E}x_{13} + c_{15} \dot{E}x_{15} + \dot{Z}_{rej.} = c_{14} \dot{E}x_{14} + c_{16} \dot{E}x_{16} \quad (6.34)$$

$$c_{16} \dot{E}x_{16} + \dot{Z}_{gen.val.} = c_{17} \dot{E}x_{17} \quad (6.35)$$

olur. $c_{24}=c_7$ ve $c_{25}=c_{26}$ için,

$$c_7 \dot{E}x_7 + c_{25} \dot{E}x_{25} + \dot{Z}_{MIE.} = c_{24} \dot{E}x_{24} + c_{26} \dot{E}x_{26} \quad (6.36)$$

olur.

6.3.3 Model 3'ün Termoekonomik Analizi

Çizelge 6.6'da Model 3 için ekipman satın alma ve kurulum maliyetleri verilmiştir. Toplam maliyet oranları EES'de hesaplanmış ve diğer maliyetler Aspen Plus yazılımının güncel ekonomik kütüphanesinden alınmıştır.

Çizelge 6.6 Model 3 için ekipman satın alma ve kurulum maliyetleri (Aspen Plus 2022).

Ekipman	Ekipman Satın Alma Maliyeti (C) (\$)	Ekipman Kurulum Maliyeti (\$)
Kabul Tankı	80 500	152 700
Kurutucu	25 900	163 600
Karıştırıcı	23 100	142 500
Reaktör	23 100	142 500
Ayırıcı	19 500	93 800
Kompresör	10 851 700	461 400
Ön Isıtıcı	66 400	109 700
Yanma Odası	301 200	69 400
GÇ Türbini	6 751 400	219 000
Evaporatör	22 700	170 400
ORC Türbini	240 600	122 900
Kondenser	32 400	101 500
Pompa	60 000	42 000
Elektroliz ünitesi	1 750 500	74 430
Toplam	20 249 000	2 065 830

Model 3'te giriş parametreleri olarak kullanılan biyogazın birim ekserjetik maliyeti $c_{biyogaz}=5.5 \times 10^{-6}$ \$/kJ ve ORC ünitesinde kullanılan toluenin birim ekserjetik maliyeti $c_{10}=5.875 \times 10^{-6}$ \$/kJ olarak Aspen Plus yazılımının ekonomik kütüphanesinden elde edilmiştir. Santralde kullanılan hava ve su ücret gerektirmez. Bu durumda $c_1=0$ ve $c_{12}=c_{13}=0$ olarak alınır. Bu doğrultuda aşağıdaki denklemler birim elektrik maliyetini hesaplamak için Model 3'te kullanılan termoekonomik denklemlerdir. Birim elektrik maliyetini hesaplarken gaz çevrimi ve ORC ünitesinin ürettikleri elektriklerin birim maliyetleri ve elektrik gücü kapasiteleri hesaba katılarak ortalama bir değer alınmıştır. $c_{elek.1}$ gaz çevriminde üretilen, $c_{elek.2}$ ORC ünitesinde üretilen elektriğin birim

maliyetidir.

$$c_{elek.1} \dot{W}_{komp.} + c_1 \dot{E}x_1 + \dot{Z}_{komp.} = c_2 \dot{E}x_2 \quad (6.37)$$

$$c_2 \dot{E}x_2 + \dot{Z}_{öl.} + c_5 \dot{E}x_5 = c_3 \dot{E}x_3 + c_6 \dot{E}x_6 \quad (6.38)$$

$$c_3 \dot{E}x_3 + \dot{Z}_{YO.} + c_{biyogaz} \dot{E}x_{biyogaz} = c_4 \dot{E}x_4 \quad (6.39)$$

olur. $c_4=c_5=c_6$ için,

$$c_4 \dot{E}x_4 + \dot{Z}_{türb.,GÇ} = c_5 \dot{E}x_5 + c_{elek.1} \dot{W}_{türb.,GÇ} \quad (6.40)$$

$$c_6 \dot{E}x_6 + c_{11} \dot{E}x_{11} + \dot{Z}_{evap.} = c_7 \dot{E}x_7 + c_8 \dot{E}x_8 \quad (6.41)$$

olur. $c_8=c_9$ için,

$$c_{10} \dot{E}x_{10} + c_{elek.2} \dot{W}_{Pompa} + \dot{Z}_{Pompa} = c_{11} \dot{E}x_{11} \quad (6.42)$$

$$c_8 \dot{E}x_8 + \dot{Z}_{türb.,ORC} = c_9 \dot{E}x_9 + c_{elek.2} \dot{W}_{türb.,ORC} \quad (6.43)$$

$$c_9 \dot{E}x_9 + \dot{Z}_{kond.} + c_{12} \dot{E}x_{12} = c_{10} \dot{E}x_{10} + c_{13} \dot{E}x_{13} \quad (6.44)$$

$$c_{elek.1} \dot{W}_{türb.,GÇ} + c_{elek.2} \dot{W}_{türb.,ORC} = c_{elek.} (\dot{W}_{türb.,GÇ} + \dot{W}_{türb.,ORC}) \quad (6.45)$$

olur. Son denklemde elde edilen $c_{elek.}$ değeri kojenerere sistemin ürettiği elektrik birim maliyetini temsil etmektedir. Elektroliz ünitesi için $c_{14}=c_{16}=0$ olmak üzere aşağıdaki termoekonomik denklem kullanılır:

$$c_{15} \dot{E}x_{15} + \dot{Z}_{Elekt.} + c_{elek.} \dot{W}_{ORC} = c_{16} \dot{E}x_{16} + c_{17} \dot{E}x_{17} \quad (6.46)$$

olur. Son denklemde bulunan c_{15} değeri üretilen hidrojenin birim maliyetini temsil etmektedir.

7. MODELLERİN TERMODİNAMİK ANALİZ SONUÇLARI

Bu bölüm, üç alt bölümden oluşmaktadır. Her alt bölümde modellerin detaylı termodinamik analiz sonuçları sunulmuştur. Analiz sonuçları kararlı durum değerlerini, egzoz gazı özelliklerini, enerji ve ekserji verimini, ekserji yıkımlarını, yakıt tüketimlerini ve net güç kapasitelerini içerir.

7.1 Model 1 İçin Termodinamik Analiz Sonuçları

7.1.1 Model 1 İçin Mevcut Gaz Çevrimi Termodinamik Analiz Sonuçları

Model 1 için mevcut gaz çevriminin termodinamik analiz sonuçları bu bölümde detaylı olarak verilmiştir. Ayrıca mevcut gaz çevrimi Model 1 için bir temel oluşturmaktadır ve %60 metan – %40 karbon dioksit karışımı biyogazı yakıt olarak kullanılmaktadır. Sonuçlara göre, yanma ürünleri ve fraksiyonları 66.64 HYO ve 8 sıkıştırma oranı ile %77.76 – N₂, %18.78 – O₂, %1.885 – H₂O ve %1.571 – CO₂ olmuştur. Çizelge 7.1’de Model 1 için mevcut gaz çevriminin kararlı durum değerleri ve Çizelge 7.2’de Model 1 için mevcut gaz çevriminin performans değerleri verilmiştir.

Çizelge 7.1 Model 1 için mevcut gaz çevriminin kararlı durum değerleri.

Durum	Akışkan	T(K)	P(kPa)	\dot{m} (kg/s)	h(kJ/kg)	s(kJ/kgK)	\dot{E}_x (kW)
1	Hava	300	100	31.97	300.4	5.705	0
2	Hava	560.5	800	31.97	566	5.744	8118
3	Hava	800	800	31.97	822.2	6.124	12664
4	Egzoz gazı	1182	800	32.45	1274	6.35	23497
5	Egzoz gazı	853	100	32.45	886.3	6.572	8760
6	Egzoz gazı	626.4	100	32.45	633.8	6.229	3913

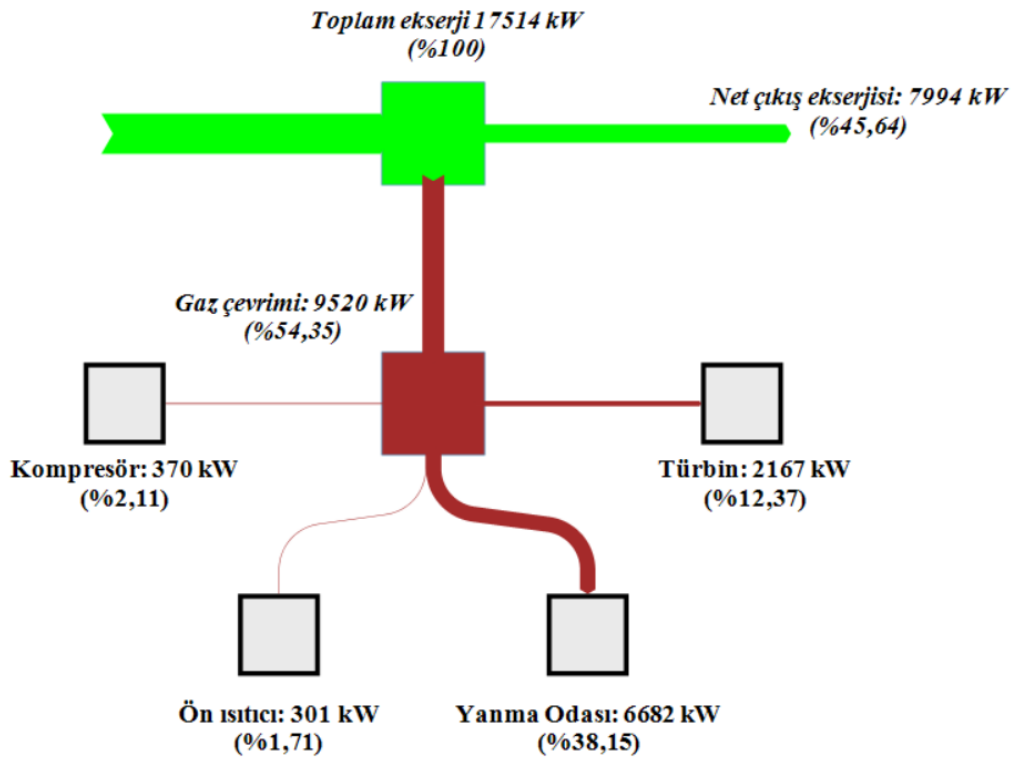
Çizelge 7.2 Model 1 için mevcut gaz çevriminin performans değerleri.

	η_{enerji} (%)	η_{ekserji} (%)	Yakıt Tüketimi (kg/s)	Net Elektrik Gücü (kW)
Mevcut Gaz çevrimi	26.06	22.84	0.4797	4000

Çizelge 7.3'te Model 1 için mevcut gaz çevrimi ekipmanlarının toplam ekserji yıkımındaki fraksiyonları ve Şekil 7.1'de Model 1 için mevcut gaz çevrimine giren yakıt ekserjisinin akışı ve ekserji akışında her bir ekipmanın fraksiyonu verilmiştir. Görüldüğü gibi en yüksek ekserji yıkımları önce yanma odasında sonra gaz çevrimi türbinindedir. Bu durumun sebebi termodinamik analiz bölümünde bahsedilen yanma reaksiyonu ve sonlu bir sıcaklık farkı boyunca gerçekleşen ısı transferleridir.

Çizelge 7.3 Model 1 için mevcut gaz çevrimi ekipmanlarının toplam ekserji yıkımındaki fraksiyonları.

Bileşen	Ekserji Yıkımı (kW)	Toplam Ekserji Yıkımındaki Fraksiyonu (%)
Kompresör	370	3.88
Ön Isıtıcı	301	3.15
Yanma Odası	6682	70.19
GÇ Türbini	2167	22.77
Toplam	9520	%100



Şekil 7.1 Model 1 için mevcut gaz çevrimine giren yakıt ekserjisinin akışı ve ekserji akışında her bir ekipmanın fraksiyonu.

7.1.2 Model 1 için Termodinamik Analiz Sonuçları

Model 1, mevcut gaz santraline bir ORC ünitesi entegre edildikten sonra kojenerasyon sistemin çok boyutlu optimize edilmesiyle elde edilmiştir. Optimizasyon sonucunda, yanma ürünleri ve fraksiyonları %77.76 – N₂, %18.54 – O₂, %2.091 – H₂O ve %1.742 – CO₂ olmuştur. Çizelge 7.4’te Model 1’in kararlı durum değerleri ve Çizelge 7.5’te Model 1 için optimize gaz çevriminin performans değerleri verilmiştir. Optimizasyon sonucunda yakıt tüketimi düşürülmüş ve daha düşük yakıt tüketimi ile aynı güç çıktısı elde edildiğinden santral verimi artmıştır.

Çizelge 7.4 Model 1’in kararlı durum değerleri.

Durum	Akışkan	T(K)	P(kPa)	\dot{m} (kg/s)	h(kJ/kg)	s(kJ/kgK)	\dot{E}_x (kW)
1	Hava	300	100	18.64	300.4	5.705	0
2	Hava	515.5	100	18.64	519.3	5.74	3887
3	Hava	780	600	18.64	800.3	6.179	6668
4	Egzoz gazı	1199	600	18.95	1301	6.459	13583
5	Egzoz gazı	834	100	18.95	870.6	6.554	4882
6	Egzoz gazı	584.7	100	18.95	594.2	6.161	1879
7	Egzoz gazı	384.7	100	18.95	382.7	5.719	385.8
8	Toluen	530.9	1444	5.831	580.7	1.21	1380
9	Toluen	404.3	5.362	5.831	396.2	1.292	159.2
10	Toluen	305	5.362	5.831	-146.5	-0.4257	0.2285
11	Toluen	305.5	1444	5.831	-144.5	-0.4247	9.6
12	Su	300	100	75.65	112.6	0.3928	0
13	Su	310	100	75.65	154.4	0.53	51.6

Çizelge 7.5 Model 1 için optimize gaz çevriminin performans değerleri.

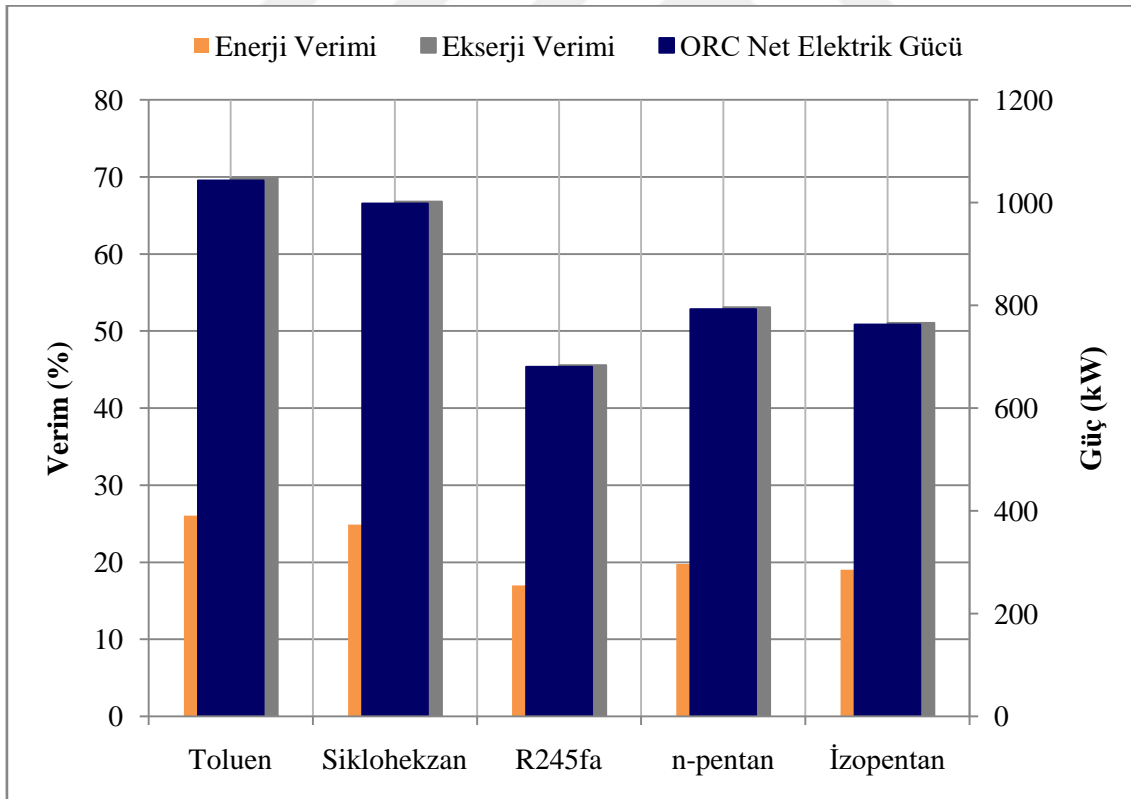
	η_{enerji} (%)	η_{ekserji} (%)	Yakıt Tüketimi (kg/s)	Net Elektrik Gücü (kW)
Optimize Gaz Çevrimi	40.24	35.27	0.3106	4000

Optimizasyonun amacı gaz çevriminin ve ORC’nin ürettiği elektriklerin maliyetlerini ayrı ayrı değil; santralin ortalama elektrik maliyetini minimize etmektir. EES bunun için

ORC net elektrik gücünü de maksimize etmiştir. Optimizasyon sonucunda, her akışkan için ORC düşük ve yüksek basıncı arasındaki fark büyüdükçe üretilen gücün arttığı görülmüştür. Model 1 için ORC’de test edilen çalışma akışkanlarının performans değerleri Çizelge 7.6’da verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre en iyi performansı gösteren ORC akışkanı toluen’dir. Şekil 7.2’de de Model 1 için ORC’de test edilen çalışma akışkanlarının performans değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 7.6 Model 1 için ORC’de test edilen çalışma akışkanlarının performans değerleri.

Akışkan	η_{enerji} (%)	η_{ekserji} (%)	ORC Net Elektrik Gücü (kW)
Toluen	26.03	69.82	1043
Sikloheksan	24.9	66.81	998
R245fa	16.98	45.55	680.4
n – pentan	19.78	53.08	792.8
İzopentan	19.03	51.05	762.6



Şekil 7.2 Model 1 için ORC’de test edilen çalışma akışkanlarının performans değerleri.

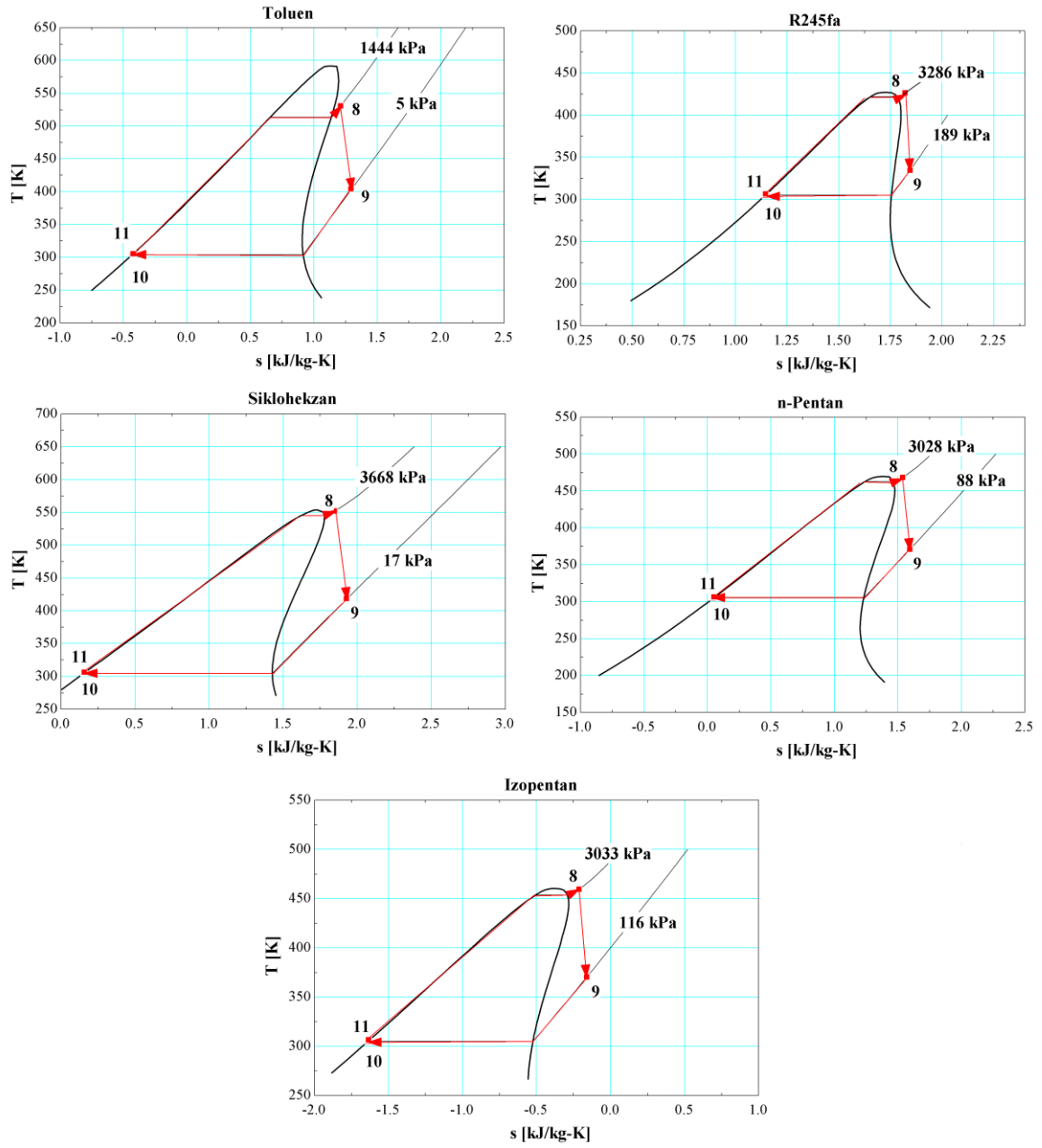
Sonuç olarak kojenerasyon sisteminin performans değerleri Model 1’in performans değerlerini

temsil etmektedir ve Çizelge 7.7’de Model 1’in termodinamik performans değerleri verilmiştir.

Çizelge 7.7 Model 1’in performans değerleri.

	η_{enerji} (%)	η_{ekserji} (%)	Yakıt Tüketimi (kg/s)	Net Elektrik Gücü (kW)
Kojenerasyon	50.74	44.47	0.3106	5043

Şekil 7.3’te Model 1 için her bir ORC çalışma akışkanının T – s diyagramı verilmiştir. T – s diyagramlarında kırmızı oklarla sınırlandırılan alan üretilen net gücü temsil eder. Bu alanlar karşılaştırıldığında toluen ve sikloheksanın en fazla ve hemen hemen benzer oranda güç ürettikleri görülmektedir.

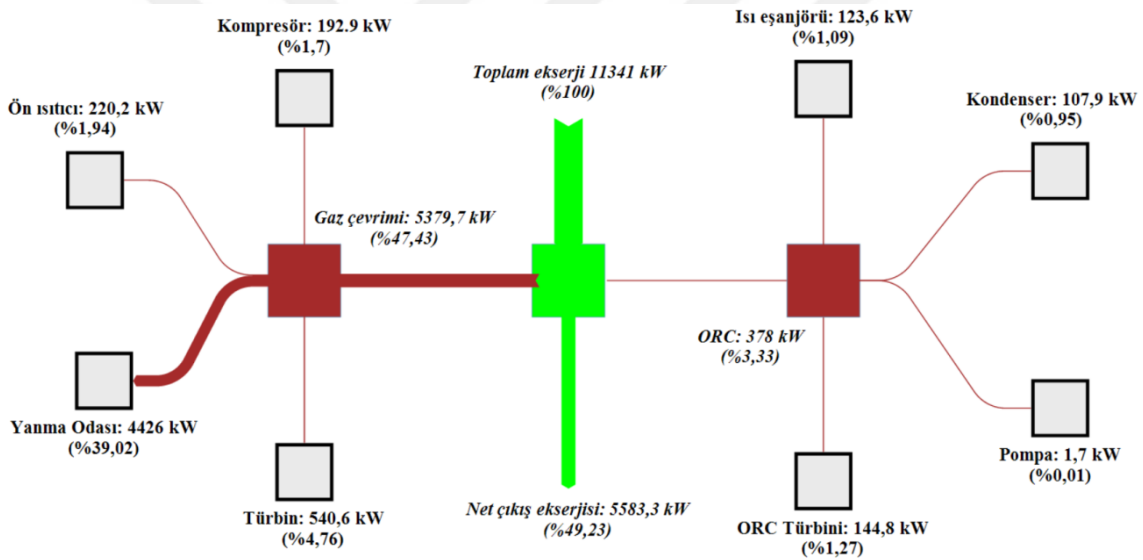


Şekil 7.3 Model 1 için her bir ORC çalışma akışkanının T – s diyagramı.

Çizelge 7.8’de Model 1’in toplam ekserji yıkımı ve ekipmanların toplam ekserji yıkımındaki fraksiyonları verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre en büyük ekserji yıkımı yanma odasındadır. Şekil 7.4’te ise Model 1’de santrale giren yakıt ekserjisinin akışı ve ekserji akışında her bir ekipmanın fraksiyonu verilmiştir. Görüldüğü gibi termoekonomik optimizasyon sonucunda ekipmanlardaki ekserjetik yıkımlar azalmıştır.

Çizelge 7.8 Model 1'in toplam ekserji yıkımı ve ekipmanların toplam ekserji yıkımındaki fraksiyonları.

Bileşen	Ekserji Yıkımı (kW)	Toplam Ekserji Yıkımındaki Fraksiyonu (%)
Kompresör	192.9	3.35
Ön Isıtıcı	220.2	3.82
Yanma Odası	4426	76.87
GÇ Türbini	540.6	9.39
Isı Eşanjörü	123.6	2.14
Pompa	1.704	0.03
ORC Türbini	144.8	2.51
Kondenser	107.9	1.87
Toplam	5757.7	100



Şekil 7.4 Model 1'de santrale giren yakıt ekserjisinin akışı ve ekserji akışında her bir ekipmanın fraksiyonu.

Son olarak EES'de tasarlanan ve optimize edilen Model 1 Aspen Plus yazılımına aktarılmış ve şematik görünümü ve simülasyonu Şekil 7.5'te verilmiştir. Şeklin sol tarafında biyogaz üretim ünitesi yer almaktadır. Mavi çizgi metan gazını, mor çizgiler gaz çevrimini, yeşil çizgiler ORC ünitesini ve kesikli kırmızı çizgiler üretilen ve kullanılan güçleri temsil etmektedir. 3.96 kg/s biyokütle nemi kurutulur ve çürütülmek üzere reaktöre gönderilir. Burada 35 °C'de çürütüldükten sonra yüksek basınç ve sıcaklıkta reaktörden çıkarılır. Daha sonra yanma işleminde kullanılmak üzere gaz

çevrimi yanma odasına gönderilir. Gaz çevriminde türbinin ürettiği 7743 kW gücün 3743 kW'lık kısmı kompresörü çalıştırmak için kullanılır. ORC ünitesinde ise türbinde üretilen 1094 kW gücün 11 kW'lık kısmı pompayı çalıştırmak için kullanılır. Bu durumda EES'de hesaplanan 5043 kW net elektrik gücüne karşılık Aspen Plus yazılımında 5083 kW güç hesaplanmıştır. Bu değerler doğrultusunda EES ve Aspen Plus'ta tasarlanan modeller çok büyük ölçüde örtüşmüştür.



7.2 Model 2 İçin Termodinamik Analiz Sonuçları

Model 1 ve Model 2 aynı mevcut gaz çevriminden oluştuğu için Model 2 için mevcut gaz çevrimi termodinamik analiz sonuçları 7.1.1 no'lu başlıktaki sonuçlarla aynıdır. Dolayısıyla bu bölümde Model 2'nin termodinamik analiz sonuçları sunulmuştur. Çizelge 7.9'da Model 2'nin kararlı durum değerleri verilmiştir.

Çizelge 7.9 Model 2'nin kararlı durum değerleri.

Durum	Akışkan	T(K)	P(kPa)	\dot{m} (kg/s)	h(kJ/kg)	s(kJ/kgK)	\dot{E}_x (kW)
1	Hava	300	100	18.64	300.4	5.706	0
2	Hava	515.5	600	18.64	519.4	5.74	3888
3	Hava	780	600	18.64	800.4	6.179	6670
4	Egzoz gazı	1199	600	18.95	1301	6.459	13585
5	Egzoz gazı	834	100	18.95	870.6	6.554	4882
6	Egzoz gazı	584.7	100	18.95	594.2	6.161	1880
7	Egzoz gazı	484.7	100	18.95	487.6	5.961	995.6
8	Su	366.3	7	0.6223	2675	8.579	76.39
9	Su	312.1	7	0.6223	163.4	0.559	1.188
10	Su	275	0.7	0.6223	163.4	0.594	0.901
11	Su	275	0.7	0.6223	2504	9.106	97.62
12	Su – LiBr	315.4	0.7	7.882	117.7	0.2468	418.3
13	Su – LiBr	315.4	7	7.882	117.7	0.2468	436.3
14	Su – LiBr	349.5	7	7.882	184	0.4463	472.3
15	LiBr	371.7	7	7.26	248.9	0.5273	746.3
16	LiBr	331.7	7	7.26	176.9	0.3198	656.2
17	LiBr	331.7	0.7	7.26	176.9	0.3198	618.7
18	Su	303	100	62.32	125.1	0.4347	4.52
19	Su	309	100	62.32	150.2	0.5166	45.43
20	Su	288	100	43.42	28.89	0.2223	123
21	Su	280	100	43.42	62.45	0.1041	262.1
22	Su	303	100	91.62	125.1	0.4347	6.646
23	Su	308	100	91.62	146	0.5031	53.74
24	Egzoz gazı	384.7	100	18.95	382.7	5.719	380
25	Su	343	200	23.63	292.4	0.9533	437.6
26	Su	363	200	23.63	376.5	1.191	799

Model 2'nin optimizasyonu Genetic yöntem ile yapılamadığından, Model 1'in gaz çevrimine parametrik optimizasyon ile iyileştirilmiş ısıtma ve soğutma üniteleri entegre edilerek Model 2 tasarlanmıştır. Çizelge 7.10'da Model 2'nin performans değerleri verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre gaz çevriminin optimizasyonu ve ısıtma – soğutma ünitelerinin entegrasyonu ile atık egzoz gazı enerjisinden faydalanılmış ve CCHP performansı artış göstermiştir. Gaz çevriminde 4000 kW elektrik gücü, soğutma ünitesinde 1457 kW soğutma gücü ve 1987 kW ısıtma gücü olmak üzere CCHP sistemi 7444 kW net güç kapasitesine sahiptir ve Model 2'yi temsil etmektedir.

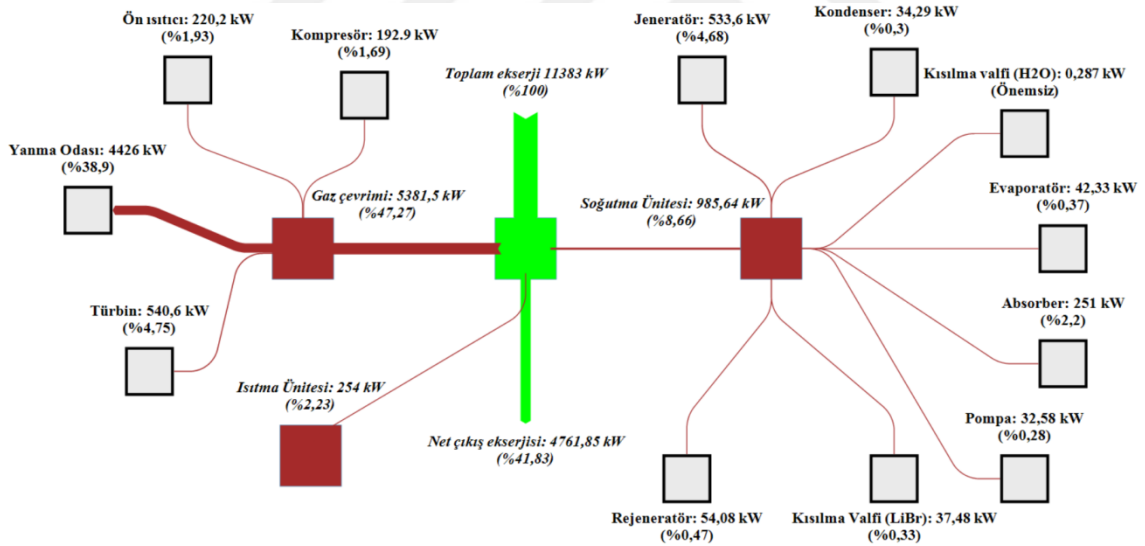
Çizelge 7.10 Model 2'nin performans değerleri.

		η_{enerji} (%)	η_{ekserji} (%)
Gaz Çevrimi		26.03	22.84
Optimize Gaz Çevrimi		40.24	35.27
Optimize Gaz Çevrimi + Soğutma Ünitesi		54.89	43.94
Optimize Gaz Çevrimi + Soğutma Ünitesi + Isıtma Ünitesi (CCHP)		74.88	50.62
		Yakıt	
$\epsilon_{\text{kullanım}}$ (%)	η_{ekserji} (%)	Tüketimi (kg/s)	Net Güç Kapasitesi (kW)
CCHP	74.88	0.3107	7444

Çizelge 7.11'de Model 2'de ki toplam ekserji yıkımı ve ekipmanların toplam ekserji yıkımındaki fraksiyonları verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre santraldeki en büyük ekserji yıkımı yanma odasındadır. Şekil 7.6'da ise Model 2'de santrale giren yakıt ekserjisinin akışı ve ekserji akışında her bir ekipmanın fraksiyonu verilmiştir. Görüldüğü gibi termoekonomik optimizasyon sonucunda ekipmanlardaki ekserjetik yıkımlar azalmıştır.

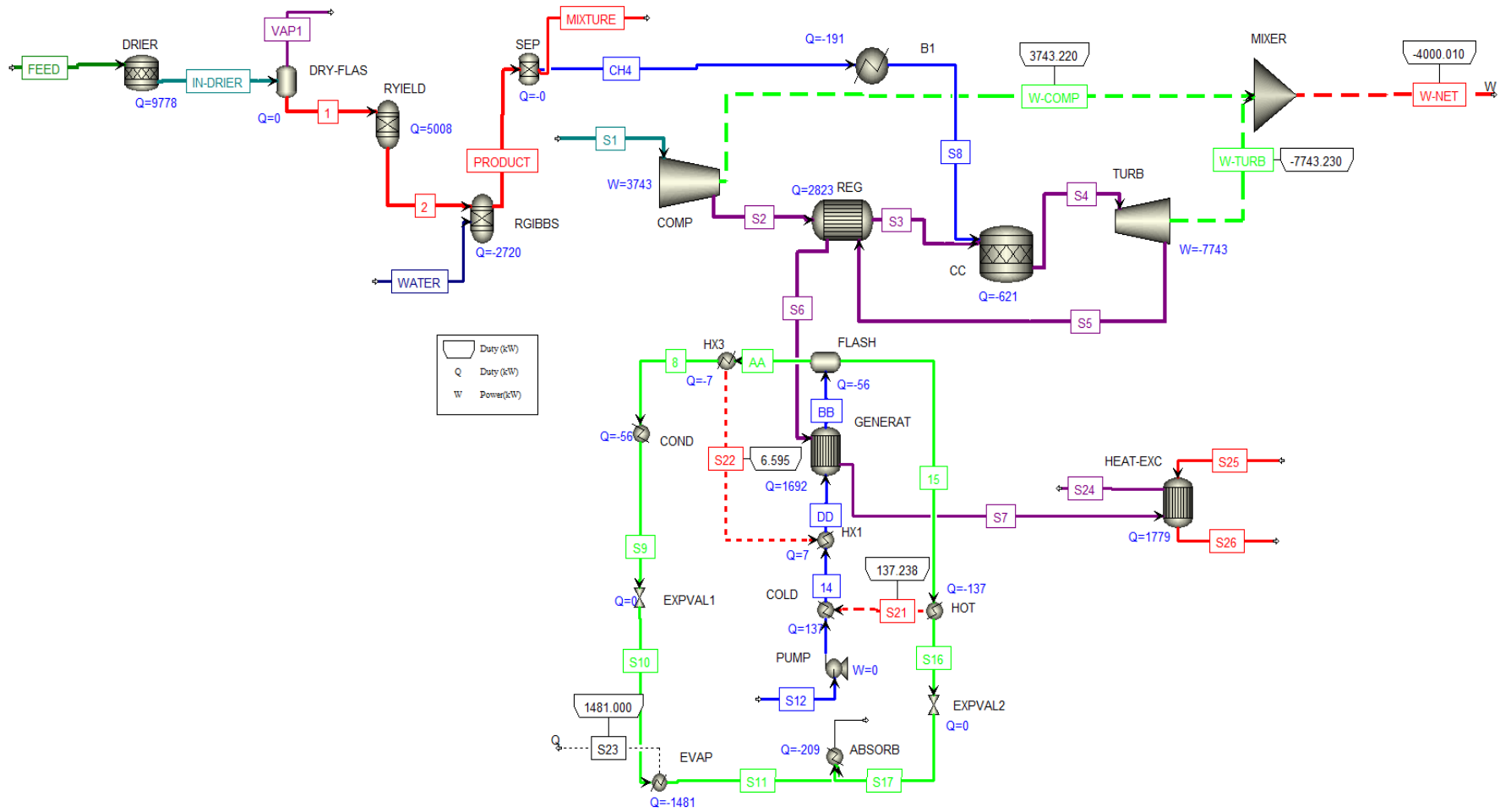
Çizelge 7.11 Model 2’de toplam ekserji yıkımı ve ekipmanların toplam ekserji yıkımındaki fraksiyonları.

Bileşen	Ekserji Yıkımı (kW)	Toplam Ekserji Yıkımındaki Fraksiyonu (%)
Kompresör	192.9	2.91
Ön Isıtıcı	220	3.32
Yanma Odası	4428	66.87
GÇ Türbini	540.6	8.16
Jeneratör	533.6	8.06
Kondenser	34.29	0.51
Evaporatör	42.33	0.64
Absorber	251	3.79
Pompa	32.58	0.5
Genleşme valfi (LiBr)	37.48	0.56
Rejeneratör	54.08	0.81
Isı değiştiricisi	254	3.83
Toplam	6621.14	100



Şekil 7.6 Model 2’de santrale giren yakıt ekserjisinin akışı ve ekserji akışında her bir ekipmanın fraksiyonu.

Şekil 7.7’de Aspen Plus’ta gaz çevrimine entegre edilen soğutma ve ısıtma üniteleri ve Şekil 7.8’de Model 2’nin Aspen Plus yazılımında şematik görünümü ve simülasyonu verilmiştir. Mavi çizgiler metan gazını, mor çizgiler gaz çevrimini, yeşil çizgiler soğutma ünitesini, düz kırmızı çizgiler ısıtma ünitesini ve kesikli kırmızı çizgiler üretilen ve kullanılan güçleri temsil etmektedir. Gaz çevriminde türbinin ürettiği 7743



Şekil 7.8 Model 2'nin Aspen Plus yazılımında şematik görünümü ve simülasyonu.

7.3 Model 3 İçin Termodinamik Analiz Sonuçları

7.3.1 Model 3 İçin Mevcut Gaz evrimi Termodinamik Analiz Sonuçları

Model 3 için mevcut gaz çevriminin termodinamik analiz sonuçları detaylı Şekilde bu bölümde verilmiştir. Ayrıca mevcut gaz evrimi Model 3 için bir temel oluşturmaktadır ve %100 metandan oluşan biyogazı yakıt olarak kullanılmaktadır. Sonuçlara göre, yanma ürünleri ve fraksiyonları %76.25 – N₂, %13.3 – O₂, %6.97 – H₂O ve %3.48 – CO₂ olmuştur. Çizelge 7.12’de Model 3 için mevcut gaz çevriminin kararlı durum değerleri ve izelge 7.13’te Model 3 için mevcut gaz çevriminin performans değerleri verilmiştir.

Çizelge 7.12 Model 3 için mevcut gaz çevriminin kararlı durum değerleri.

Durum	Akışkan	T(K)	P(kPa)	ṁ(kg/s)	h(kJ/kg)	s(kJ/kgK)	Ė _x (kW)
1	Hava	300	100	13.15	300.4	5.705	0
2	Hava	532.9	600	13.15	537.4	5.774	2844
3	Hava	748.8	600	13.15	766.3	6.134	4434
4	Egzoz gazı	1430	600	13.41	1770	6.99	13521
5	Egzoz gazı	1014	100	13.41	1236	7.087	5971
6	Egzoz gazı	829.6	100	13.41	1012	6.843	3943

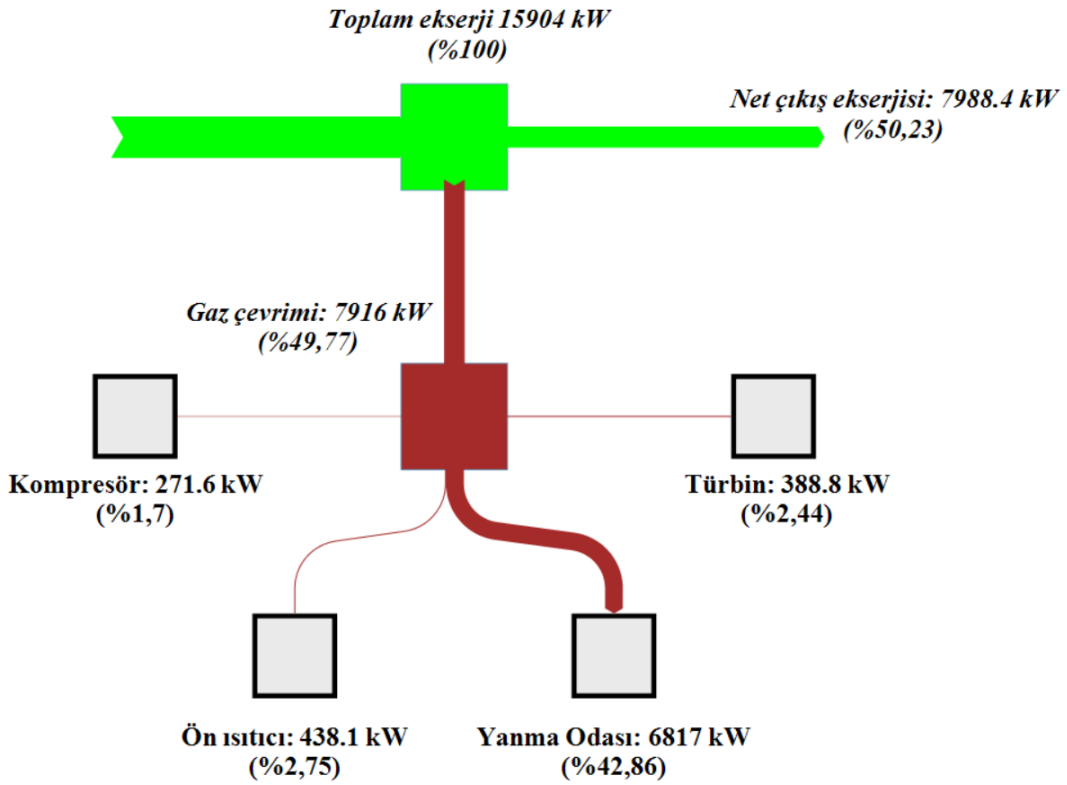
Çizelge 7.13 Model 3 için mevcut gaz çevriminin performans değerleri.

	η _{enerji} (%)	η _{ekserji} (%)	Yakıt Tüketimi (kg/s)	Net Elektrik Gücü (kW)
Mevcut Gaz evrimi	28.69	25.15	0.263	4000

Çizelge 7.14’te Model 3 için mevcut gaz çevrimi ekipmanlarının toplam ekserji yıkımındaki fraksiyonları ve Şekil 7.9’da Model 3 için mevcut gaz çevrimine giren yakıt ekserjisinin akışı ve ekserji akışında her bir ekipmanın fraksiyonu verilmiştir.

Çizelge 7.14 Model 3 için mevcut gaz çevrimi ekipmanlarının toplam ekserji yıkımındaki fraksiyonları.

Bileşen	Ekserji Yıkımı (kW)	Toplam Ekserji Yıkımındaki Fraksiyonu (%)
Kompresör	271.6	3.43
Ön Isıtıcı	438.2	5.53
Yanma Odası	6817	86.12
GÇ Türbini	388.8	4.911
Toplam	7916	%100



Şekil 7.9 Model 3 için mevcut gaz çevrimine giren yakıt ekserjisinin akışı ve ekserji akışında her bir ekipmanın fraksiyonu.

7.3.2 Model 3 İçin Termodinamik Analiz Sonuçları

Model 3, mevcut gaz santraline bir ORC ünitesi entegre edildikten sonra kojenerasyon sistemin çok boyutlu optimize edilmesiyle elde edilmiştir. Modelin yakıt tüketimi 0.263 kg/s'dir. Optimizasyon sonucunda, yanma ürünleri ve fraksiyonları %77.01 – N₂, %15.44 – O₂, %5.03 – H₂O ve %2.51 – CO₂ olmuştur. Çizelge 7.15'te Model 3'ün kararlı durum değerleri verilmiştir. Çizelge 7.16'da Model 3 için optimize gaz

çevriminin performans değerleri verilmiştir.

Çizelge 7.15 Model 3'ün kararlı durum değerleri.

Durum	Akışkan	T(K)	P(kPa)	\dot{m} (kg/s)	h(kJ/kg)	s(kJ/kgK)	\dot{E}_x (kW)
1	Hava	300	100	18.41	300.4	5.705	0
2	Hava	610	939.3	18.41	617.8	5.786	5395
3	Hava	780	939.3	18.41	800.3	6.05	7298
4	Egzoz gazı	1290	939.3	18.67	1518	6.614	16403
5	Egzoz gazı	829.9	100	18.67	954.5	6.741	5173
6	Egzoz gazı	673.6	100	18.67	774.6	6.501	3158
7	Egzoz gazı	473.6	100	18.67	553.4	6.112	1208
8	Toluen	589.7	3714	5.577	634	1.249	1550
9	Toluen	417.9	5.362	5.577	417.4	1.344	184.1
10	Toluen	305	5.362	5.577	-146.5	-0.4257	0.2186
11	Toluen	306.3	3714	5.577	-141.4	-0.4232	24
12	Su	300	100	75.18	112.6	0.3928	0
13	Su	310	100	75.18	154.4	0.53	51.27

Çizelge 7.16 Model 3 için optimize gaz çevriminin performans değerleri.

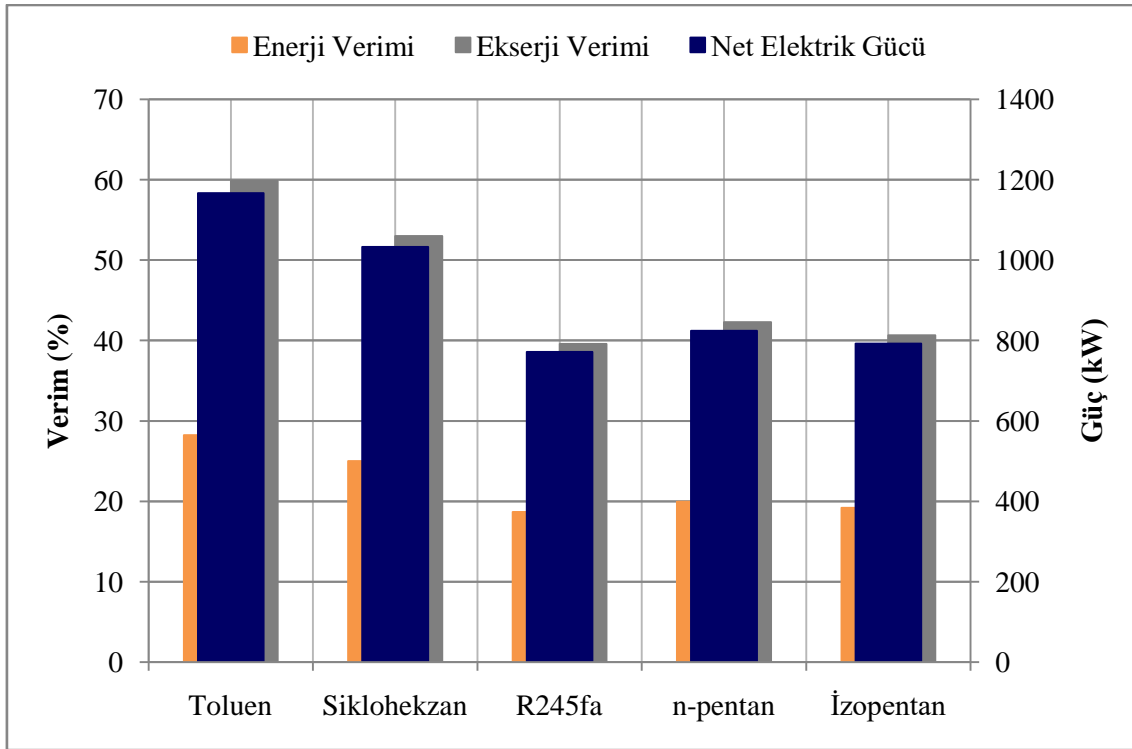
	η_{enerji} (%)	η_{ekserji} (%)	Yakıt Tüketimi (kg/s)	Net Elektrik Gücü (kW)
Optimize Gaz Çevrimi	33.18	29.08	0.263	4625

Optimizasyonun amacı gaz çevriminin ve ORC'nin ürettiği elektriklerin toplam kapasitesini maksimize etmektir. Optimizasyon sonucunda, her akışkan için ORC düşük ve yüksek basıncı arasındaki fark büyüdükçe üretilen gücün arttığı görülmüştür. Model 3 için ORC'de test edilen çalışma akışkanlarının performans değerleri Çizelge 7.17'de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre en iyi performansı gösteren ORC akışkanı toluen'dir. Model 1'de gaz çevrimini terk eden 6 durumundaki egzoz gazının düşük sıcaklığı sebebiyle ORC ünitesinde toluen'in yüksek basıncı kritik basıncının 0.35 katı alınmıştı. Ancak Model 3'te 6 durumundaki egzoz gazının sıcaklığı yüksek olduğundan toluen'in yüksek basıncını kısıtlayan bir faktör bulunmamakta ve toluen Model 1'e göre daha iyi bir birim performans göstermektedir. Şekil 7.10'da da Model 3 için ORC'de

test edilen çalışma akışkanlarının performans değerleri gösterilmiştir.

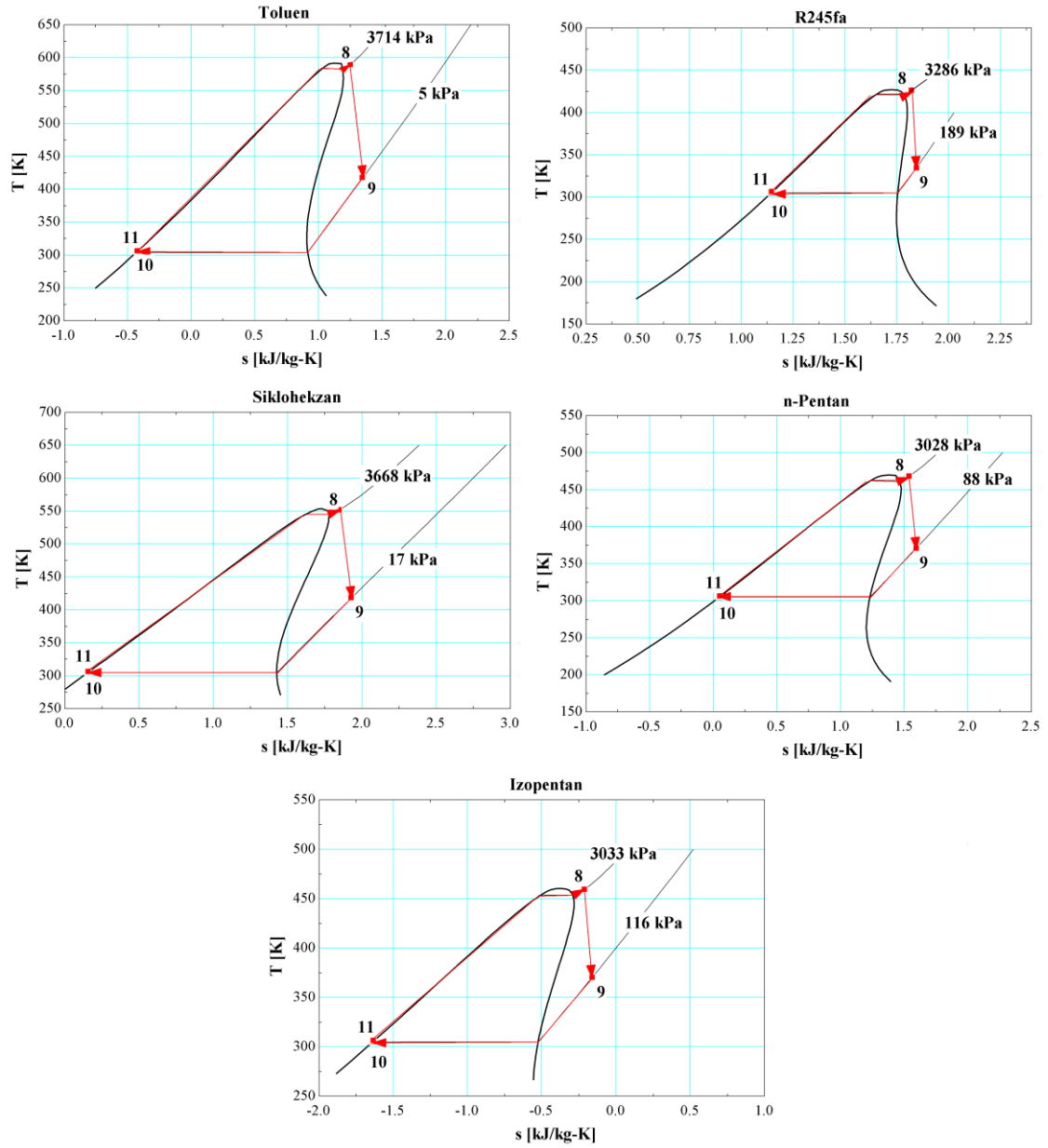
Çizelge 7.17 Model 3 için ORC’de test edilen çalışma akışkanlarının performans değerleri.

Akışkan	η_{enerji} (%)	η_{ekserji} (%)	ORC Net Elektrik Gücü (kW)
Toluen	28.25	59.83	1167
Sikloheksan	25.02	52.99	1033
R245fa	18.69	39.58	771.8
n – pentan	19.96	42.27	824.1
İzopentan	19.2	40.66	792.7



Şekil 7.10 Model 3 için ORC’de test edilen çalışma akışkanlarının performans değerleri.

Şekil 7.11’de Model 3 için her bir ORC çalışma akışkanının T – s diyagramı verilmiştir. Model 1’de toluen ile sikloheksan birbirine yakın performans göstermekteydi. Ancak Model 3’te toluen’in yüksek basıncı arttığı için T – s diyagramında okların içerisinde kalan alan büyümüş ve dolayısıyla sikloheksana göre daha da iyi bir birim performans göstermiştir.



Şekil 7.11 Model 3 için her bir ORC çalışma akışkanının T – s diyagramı.

Sonuç olarak kojenerasyon sisteminin performans değerleri Model 3'ün performans değerlerini temsil etmektedir ve Çizelge 7.18'de verilmiştir.

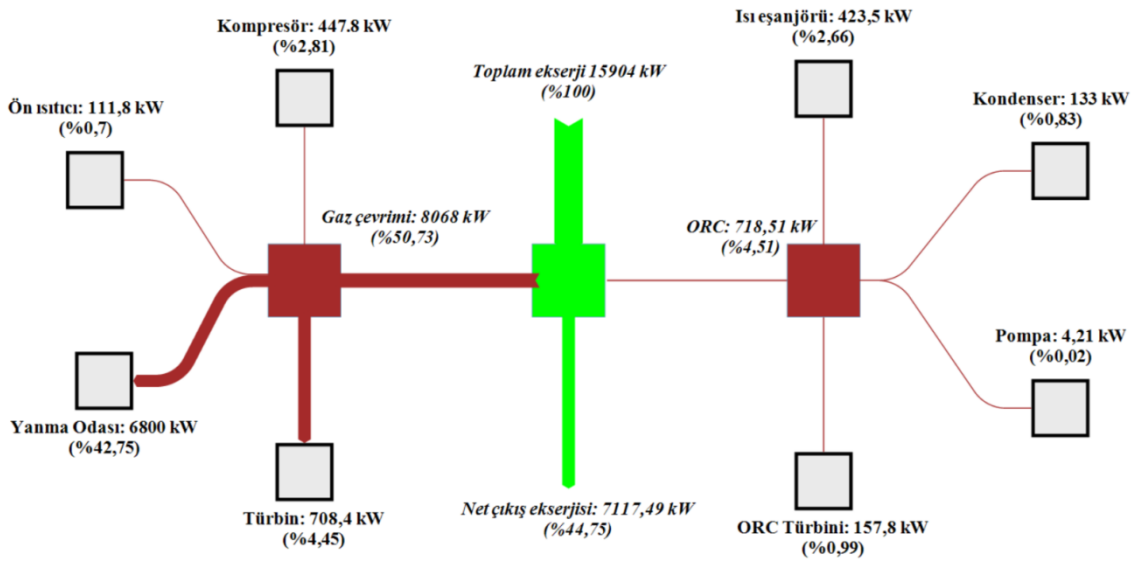
Çizelge 7.18 Model 3'ün performans değerleri.

	η_{enerji} (%)	η_{ekserji} (%)	Yakıt Tüketimi (kg/s)	Net Elektrik Gücü (kW)
Kojenerasyon	41.55	36.42	0.263	5792

Çizelge 7.19’da Model 3 için toplam ekserji yıkımı ve ekipmanların toplam ekserji yıkımındaki fraksiyonları verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre en büyük ekserji yıkımı yanma odasındadır. Şekil 7.12’de ise Model 3’te santrale giren yakıt ekserjisinin akışı ve ekserji akışında her bir ekipmanın fraksiyonu verilmiştir. EES santralin toplam elektrik gücünü artırmak için HYO ve sıkıştırma oranını artırmıştır. Ekserjetik kayıplar, kompresör ve türbinde sürtünmelere bağlı olarak artarken; ön ısıtıcıda sıcaklığın düşüşüyle azalmıştır.

Çizelge 7.19 Model 3 için toplam ekserji yıkımı ve ekipmanların toplam ekserji yıkımındaki fraksiyonları.

Bileşen	Ekserji Yıkımı (kW)	Toplam Ekserji Yıkımındaki Fraksiyonu (%)
Kompresör	447.8	5.09
Ön Isıtıcı	111.8	1.27
Yanma Odası	6800	77.39
GÇ Türbini	708.4	8.06
Isı Eşanjörü	423.5	4.82
Pompa	4.212	1.79
ORC Türbini	157.8	1.51
Kondenser	133	0.04
Toplam	8786.51	100



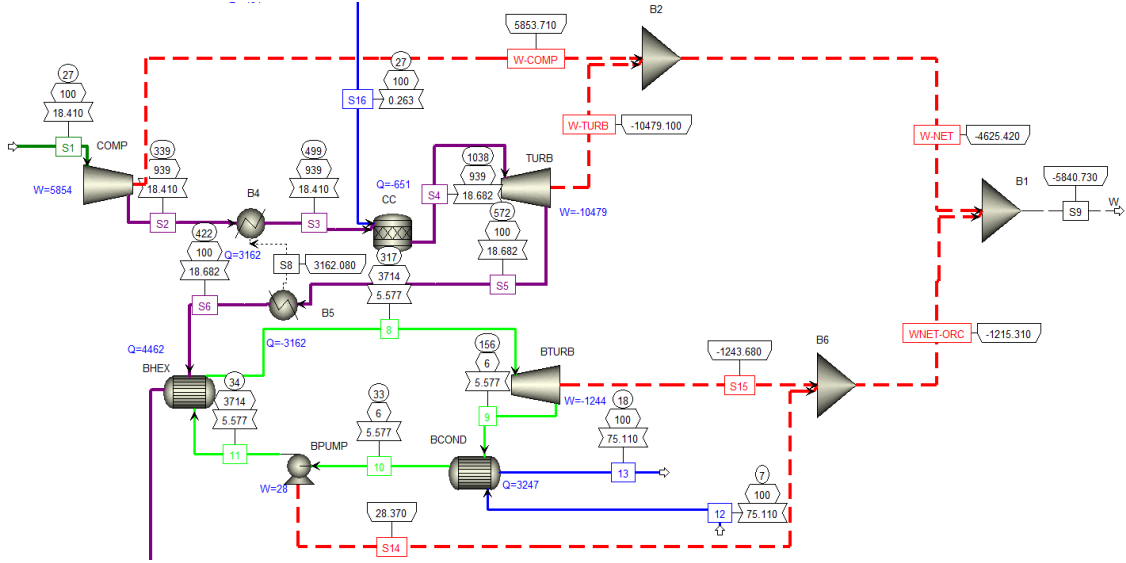
Şekil 7.12 Model 3’te santrale giren yakıt ekserjisinin akışı ve ekserji akışında her bir ekipmanın fraksiyonu.

ORC ünitesinin ürettiği gücü kullanan elektroliz ünitesinin EES’de termodinamik analiz sonuçları Çizelge 7.20’de verilmiştir.

Çizelge 7.20 Elektroliz ünitesinin termodinamik analiz sonuçları.

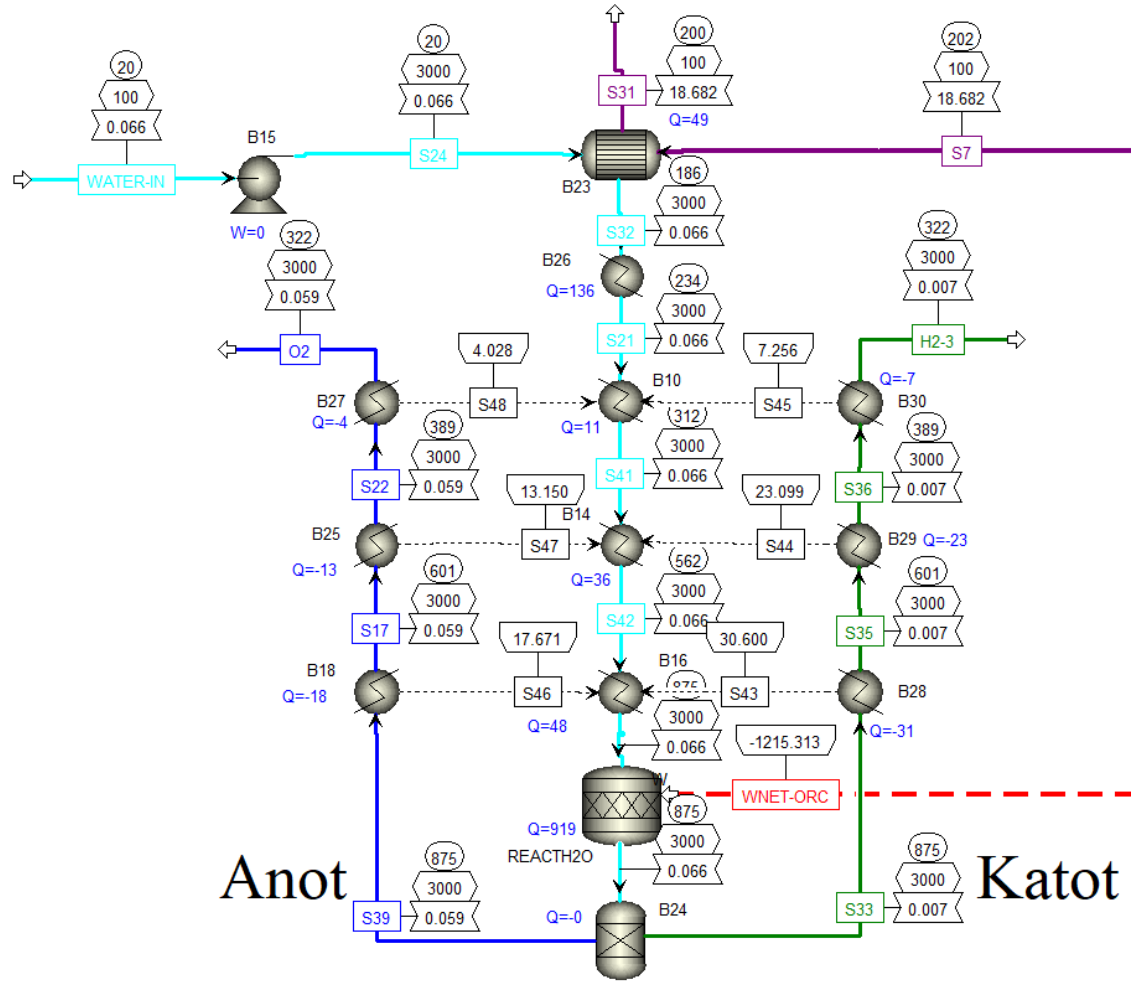
Parametre	Değer
Kullanılan su debisi (kg/s)	0.06655
η_{enerji} (%)	76.74
η_{ekserji} (%)	74.76
Elektroliz gerilimi (Volt)	1.636
Elektroliz tersinir gerilimi (Volt)	1.227
Elektroliz ekserji yıkımı (kW)	63.08
Üretilen hidrojen debisi (kg/s)	0.007447
Birim hidrojen üretim gücü (kWh/kg)	43.51

Şekil 7.13’te Model 3’ün gaz çevrimi ve ORC ünitesinin Aspen Plus yazılımında şematik görünümü ve simülasyonu verilmiştir. Gaz çevrimi türbininde 10479 kW güç üretmekte, bu gücün 5853.71 kW’lık kısmı kompresörü çalıştırmak için kullanılmaktadır. Dolayısıyla üretilen 4625.42 kW net elektrik gücü EES’de hesaplanan değer ile aynıdır. 422 °C sıcaklıktaki egzoz gazı ORC ünitesini tahrik ettiğinde ORC türbini 1243.68 kW gücü üretmekte, bu gücün 28 kW’lık kısmı ORC ünitesinin pompasını çalıştırmak için kullanılmaktadır. Dolayısıyla ORC’de üretilen net elektrik gücü 1215.31 kW ile EES’de hesaplanan 1167 kW değeri büyük ölçüde örtüşmektedir. Bu durumda Aspen Plus’ta modellenen santral 5840.73 kW net elektrik gücü üretmektedir.



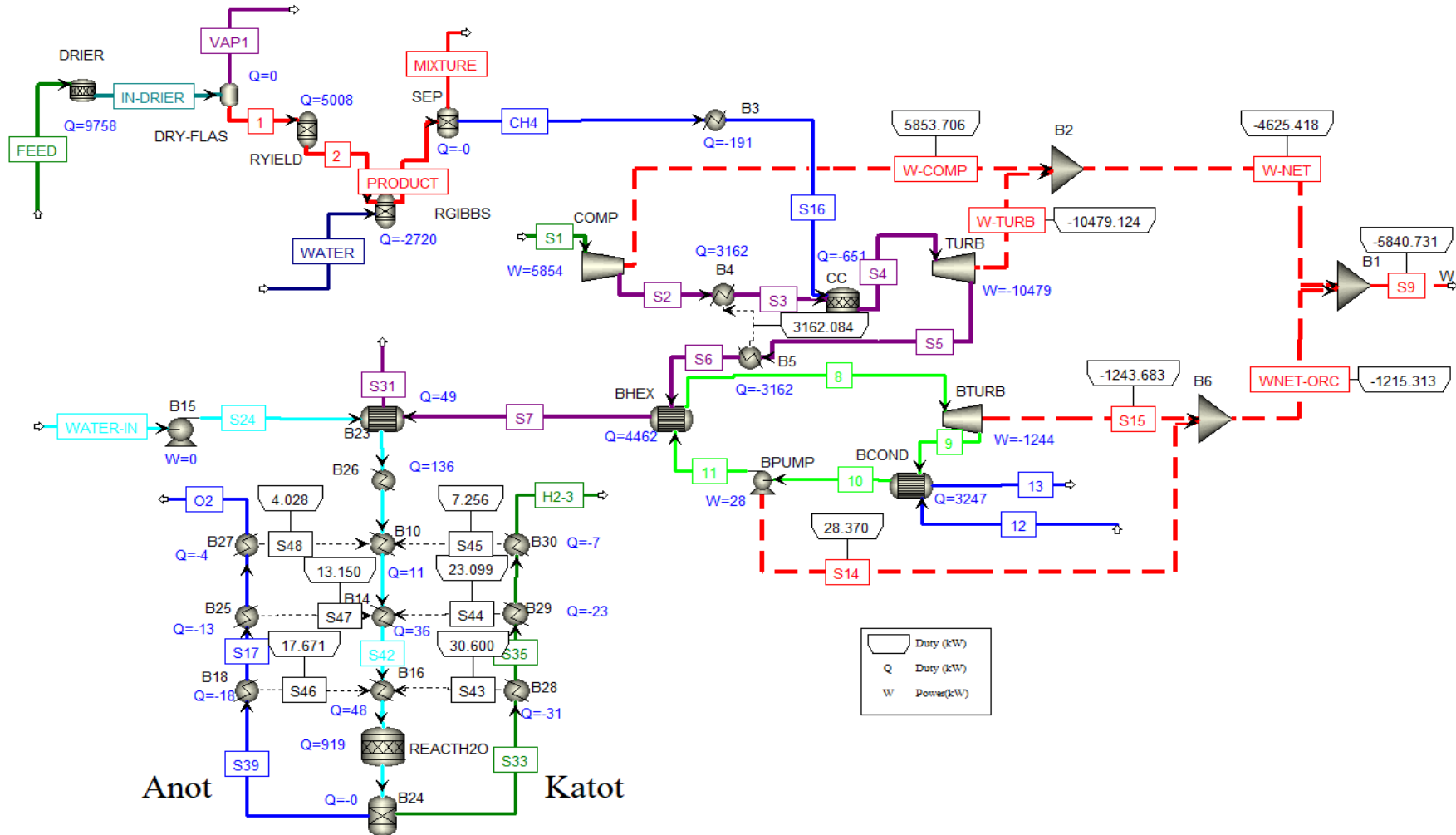
Şekil 7.13 Model 3'te gaz çevrimi ve ORC ünitesinin Aspen Plus yazılımında şematik görünümü ve simülasyonu.

Şekil 7.14'te ise elektroliz ünitesinin Aspen Plus yazılımında şematik görünümü ve simülasyonu verilmiştir. ORC ünitesini terk eden egzoz gazı 202 °C sıcaklıktadır ve halen yüksek enerjiye sahiptir. Bu enerjiyi kullanmak amacıyla egzoz gazı elektroliz için suyu ısıtır. Kalan enerji ihtiyacı ORC ünitesi tarafından karşılanır. Şekilde görüldüğü gibi elektroliz sonucunda 0.066 kg/s su debisi ile 0.007 kg/s hidrojen üretilir. Bu değerler EES'de hesaplanan değerlerle aynıdır.



Şekil 7.14 Elektroliz ünitesinin Aspen Plus yazılımında şematik görünümü ve simülasyonu.

Son olarak Şekil 7.15'te Model 3'ün Aspen Plus yazılımında şematik görünümü ve simülasyonu verilmiştir.



Şekil 7.15 Model 3'ün Aspen Plus yazılımında şematik görünümü ve simülasyonu.

8. TERMOEKONOMİK ANALİZ SONUÇLARI

Bu bölüm, üç alt bölümden oluşmuştur. Her alt bölümde her bir modelin termoeconomik analiz sonuçları detaylı şekilde sunulmuştur. Analiz sonuçları ekipmanların toplam maliyet oranlarını, birim maliyet oranlarını ve ekserji maliyetlerini içerir.

8.1 Model 1 İçin Termoeconomik Analiz Sonuçları

Çizelge 8.1’de Model 1 için toplam maliyet oranları, Çizelge 8.2’de Model 1 için mevcut gaz çevriminin birim maliyet oranları, ekserji ve ekserji maliyetleri verilmiştir.

Çizelge 8.1 Model 1 için toplam maliyet oranları.

Ekipman	Toplam Maliyet Oranı (Z) (\$/h)
Kabul Tankı	1.73
Kurutucu	0.556
Karıştırıcı	0.496
Reaktör	0.496
Ayırıcı	0.419
Kompresör	181.48
Ön Isıtıcı	0.365
Yanma Odası	6.471
GÇ Türbini	115.8
Evaporatör	0.453
ORC Türbini	4.402
Kondenser	0.764
Pompa	0.421

Çizelge 8.2 Model 1 için mevcut gaz çevriminin birim maliyet oranları, ekserji ve ekserji maliyetleri.

Durum	c (\$/GJ)	\dot{E}_x (kW)	\dot{C} (\$/h)
1	0	0	0
2	14.66	8118	428.3
3	13.84	12664	631
4	11.57	23497	978.8
5	11.57	8760	364.9
6	11.57	3913	163
Birim Elektrik Maliyeti (\$/kWh)			0.04942

Model 1'in birim maliyet oranları, ekserji ve ekserji maliyetleri Çizelge 8.3'te verilmiştir. Model 1'in termoeconomik optimizasyonu sonucunda, ekipmanların ekserji yıkımlarının azaltılmasıyla ve ORC entegrasyonu ile atık egzoz gazı enerjisinden faydalanarak elektriğin birim maliyeti düşürülmüştür.

Çizelge 8.3 Model 1'in birim maliyet oranları, ekserji ve ekserji maliyetleri.

Durum	c (\$/GJ)	\dot{E}_x (kW)	\dot{C} (\$/h)
1	0	0	0
2	12.81	3887	179.2
3	12.29	6668	295
4	10.65	13583	520.7
5	10.65	4882	187.1
6	10.65	1879	72.04
7	55.92	385.8	77.66
8	-0.8293	1380	-4.119
9	-0.8293	159.2	-0.4752
10	5.875	0.2285	0.004833
11	15.15	9.6	0.5235
12	0	0	0
13	0	51.6	0
Birim Elektrik Maliyeti (\$/kWh)			0.03778
Mevcut Santrale Göre Değişim (%)			-23.55

8.2 Model 2 İçin Termoekonomik Analiz Sonuçları

Çizelge 8.4'te Model 2 için toplam maliyet oranları verilmiştir.

Çizelge 8.4 Model 2 için toplam maliyet oranları.

Ekipman	Toplam Maliyet Oranı (Z) (\$/h)
Kabul Tankı	1.73
Kurutucu	0.556
Karıştırıcı	0.496
Reaktör	0.496
Ayırıcı	0.419
Kompresör	181.48
Ön Isıtıcı	0.365
Yanma Odası	6.471
G Türbini	115.8
Jeneratör	0.281
Kondenser	0.474
Genleşme Valfi (H ₂ O)	0.18
Evaporatör	2.066
Absorber	0.416
Pompa	0.29
Genleşme Valfi (LiBr)	0.18
Rejeneratör	0.734
Isı Eşanjörü	0.23

Model 2'nin mevcut gaz evrimi Model 1'in mevcut gaz çevrimi ile aynı olduğundan Model 2 için mevcut gaz çevriminin birim maliyet oranları, ekserji ve ekserji maliyetleri için izelge 8.2'de görölmektedir. Model 2'nin birim maliyet oranları, ekserji ve ekserji maliyetleri izelge 8.5'te verilmiştir. Model 2'nin termoekonomik optimizasyonu sonucunda, ekipmanların ekserji yıkımlarının azaltılmasıyla birim maliyetler düşürölmüştür.

Çizelge 8.5 Model 2'nin birim maliyet oranları, ekserji ve ekserji maliyetleri.

Durum	c (\$/GJ)	\dot{E}_x (kW)	\dot{C} (\$/h)
1	0	0	0
2	12.81	3888	179.3
3	12.29	6670	295.1
4	10.65	13585	520.8
5	10.65	4882	187.2
6	10.65	1880	72.06
7	10.65	995.6	38.17
8	495.8	76.39	136.3
9	495.8	1.188	2.12
10	786.2	0.901	2.55
11	-17.82	97.62	-6.262
12	5.8	418.3	8.733
13	7.186	436.3	11.29
14	7.186	472.3	12.22
15	-16.98	746.3	-45.63
16	-16.98	656.2	-40.12
17	-17.82	618.7	-39.69
18	0	4.52	0
19	860	45.43	140.7
20	0	123	0
21	9.796	262.1	9.241
22	0	6.646	0
23	-249.3	53.74	-48.24
24	10.65	380	14.57
25	4.952	437.6	7.8
26	4.952	799	14.24
Birim Elektrik Maliyeti (\$/kWh)			0.04176
Mevcut Hale Göre Değişim (%)			-15.5
Birim Soğutma Maliyeti (\$/kWh)			0.03526
Birim Isıtma Maliyeti (\$/kWh)			0.01783

8.3 Model 3 İçin Termoekonomik Analiz Sonuçları

Çizelge 8.6'da Model 3 için toplam maliyet oranları, izelge 8.7'de Model 3 için mevcut gaz çevriminin birim maliyet oranları, ekserji ve ekserji maliyetleri verilmiştir.

Çizelge 8.6 Model 3 için toplam maliyet oranları.

Ekipman	Toplam Maliyet Oranı (\dot{Z}) (\$/h)
Kabul Tankı	1.73
Kurutucu	0.556
Karıştırcı	0.496
Reaktör	0.496
Ayırıcı	0.419
Kompresör	233.149
Ön Isıtıcı	1.426
Yanma Odası	6.471
G Türbini	145.054
Evaporatör	0.487
ORC Türbini	5.169
Kondenser	0.696
Pompa	1.289
Elektroliz ünitesi	37.61

Çizelge 8.7 Model 3 için mevcut gaz çevriminin birim maliyet oranları, ekserji ve ekserji maliyetleri.

Durum	c (\$/GJ)	\dot{E}_x (kW)	\dot{C} (\$/h)
1	0	0	0
2	14.02	2844	143.6
3	14.13	4434	225.5
4	11.12	13521	541.5
5	11.12	5971	239.1
6	11.12	3943	157.9
Birim Elektrik Maliyeti (\$/kWh)			0.04323

Model 3'ün birim maliyet oranları, ekserji ve ekserji maliyetleri Çizelge 8.8'de verilmiştir. Model 3'ün termodinamik optimizasyonu sonucunda, ekipmanların ekserji yıkımlarının azaltılmasıyla ve ORC entegrasyonu ile atık egzoz gazı enerjisinden faydalanarak elektriğin birim maliyeti hafif bir şekilde düşürülmüştür. Optimizasyon, santralin toplam net güç çıkışını artırmak amacıyla yapıldığından elektriğin birim maliyetinde ciddi bir düşüş görülmemiştir.

Çizelge 8.8 Model 3'ün birim maliyet oranları, ekserji ve ekserji maliyetleri.

Durum	c (\$/GJ)	\dot{E}_x (kW)	\dot{C} (\$/h)
1	0	0	0
2	13.65	5395	265
3	13.22	7298	347.2
4	11.23	16403	663.3
5	11.23	5173	209.2
6	11.23	3158	127.7
7	31.02	1208	134.9
8	-1.161	1550	-6.479
9	-1.161	184.1	-0.7693
10	5.875	0.2186	0.004623
11	4.463	24	0.3856
12	0	0	0
13	0	51.27	0
Birim Elektrik Maliyeti (\$/kWh)			0.03922
Mevcut Santrale Göre Değişim (%)			-9.27

Elektroliz ünitesinin termoekonomik sonuçları Çizelge 8.9'da verilmiştir.

Çizelge 8.9 Elektroliz ünitesinin termoekonomik sonuçları.

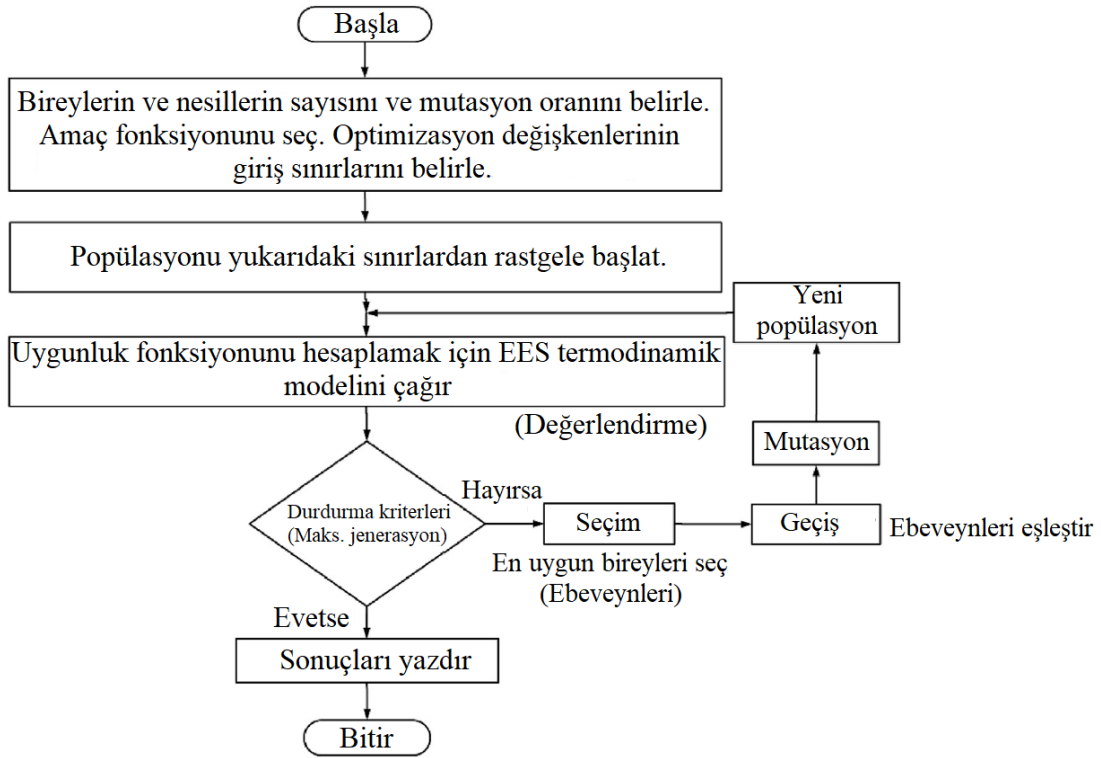
Durum	c (\$/GJ)	\dot{E}_x (kW)	\dot{C} (\$/h)
15	0	3.325	0
16	0	234.6	0
17	26.54	872.2	83.33

Parametre	Değer
Hidrojen ekserji maliyeti \dot{C} (\$/h)	83.33
Birim hidrojen maliyeti (\$/kg)	3.191

9. OPTİMİZASYON SONUÇLARI

Optimizasyon problemlerinin tipik olarak üç temel unsuru vardır. Birincisi, maksimize veya minimize edilecek tek bir sayısal nicelik veya amaç fonksiyonudur. Amaç, örneğin bir hisse senedi portföyünün getirisi, bir şirketin üretim maliyetleri veya kârları veya bir aracın belirli bir varış noktasına varış zamanı olabilir. İkinci unsur, amacı maksimize veya minimize etmek için değerleri değişebilen bir değişkenler topluluğudur. Verilen örnekler için alınacak veya satılacak stok miktarları, farklı üretim faaliyetlerine tahsis edilecek çeşitli kaynakların miktarları veya bir trafik ağı üzerinden bir aracın izleyeceği rota değişkenlere örnek sayılabilir. Optimizasyon probleminin üçüncü unsuru, değişkenlerin alabileceği değerler üzerindeki bir dizi kısıtlamadır. Örneğin, bir üretim süreci, mevcut olandan daha fazla kaynak gerektiremez veya sıfırdan daha az kaynak kullanamaz. Bu geniş çerçevede, optimizasyon bir amacı etkileyen çeşitli değişkenlerin belirli sınırlar içerisinde değiştirilmesi ile amacın artırılıp azaltılması mantığına dayalı problemleri çözme tekniğidir.

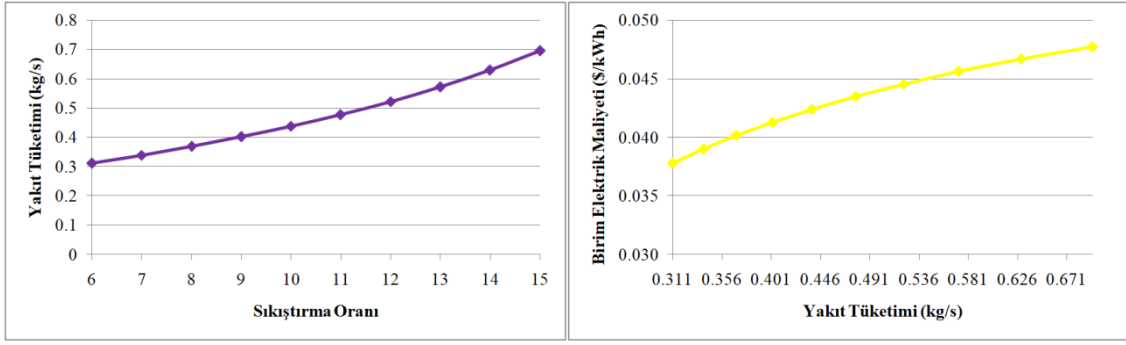
Bu çalışmada EES’de optimizasyon için Genetic yöntem kullanılmıştır. Süre sorunu olmaması sebebiyle birey sayısı 256, nesil sayısı 2048 ve maksimum mutasyon oranı 0.2625 olarak belirlenmiş ve dolayısıyla detaylı ve uzun süren bir optimizasyon süreci oluşturulmuştur. Her bir modelin optimizasyonunda HYO, kompresör sıkıştırma oranı, ön ısıtıcı sıcaklığı, soğutma ünitesi düşük ve yüksek basınçları, ORC ünitesi düşük ve yüksek basınçları, ORC çalışma akışkanı türü gibi performans üzerinde son derece önemli değişkenler maliyetleri düşürmek amacıyla optimize edilmiştir (İnt. Kyn. 1). Ancak Model 2’de ki LiBr soğutma ünitesi için EES’nin akademik versiyonunun kullanılması gerekmektedir. Bu versiyonda ise yalnızca Golden Section search ve Quadratic Approximations yöntemlerini kullanmak mümkündür. Bu noktada Model 2’nin optimizasyonu için parametrik optimizasyon yöntemi seçilmiştir. Şekil 9.1’de EES’de genetik bir yöntem kullanılarak sistem optimizasyonunun akış şeması verilmiştir.



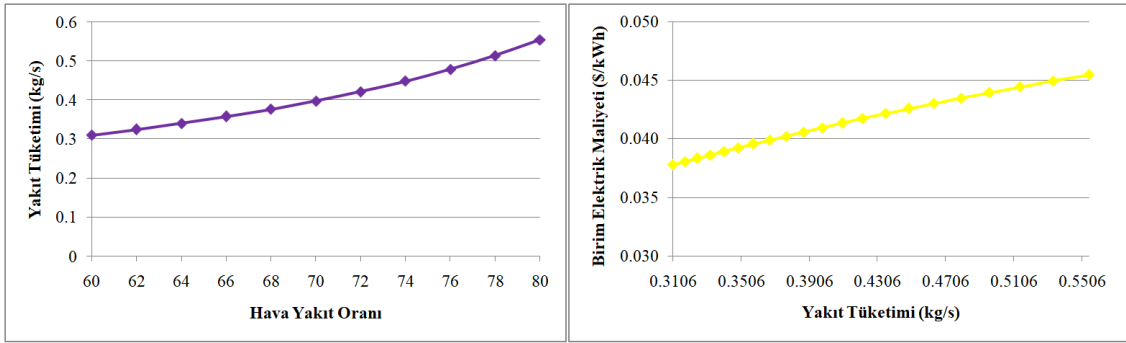
Şekil 9.1 EES'de genetik bir yöntem kullanılarak gerçekleştirilen sistem optimizasyonunun akış şeması (Ibrahim vd. 2021).

9.1 Model 1 İçin Optimizasyon Sonuçları

Termoekonomik açıdan optimize edilen Model 1'in optimizasyonu sonucunda optimum HYO 60 ve sıkıştırma oranı 6 olmuştur. Şekil 9.2'de Model 1 için sıkıştırma oranına bağlı olarak yakıt tüketiminin değişimi ve Şekil 9.3'te ise Model 1 için HYO'ya bağlı olarak yakıt tüketiminin değişimi verilmiştir. HYO ve sıkıştırma oranının artışı kritik değerlere ulaşmadıkları sürece santral performansını artırır. Model 1'de çıkış gücünü artırmak yerine sabit 4000 kW çıkış gücü ile üretilen elektriğin birim maliyetini düşürmek için optimizasyon yapılmıştır. Sabit 4000 kW çıkış gücü ile elektrik maliyetini düşürmek için yakıt tüketiminin düşmesi gereklidir. Şekil 9.2 ve 9.3'ten anlaşıldığı gibi EES, HYO ve sıkıştırma oranını düşürerek yakıt tüketimini azaltmış ve birim elektrik maliyetini düşürmüştür.



Şekil 9.2 Model 1 için sıkıştırma oranına bağlı olarak yakıt tüketiminin değişimi.

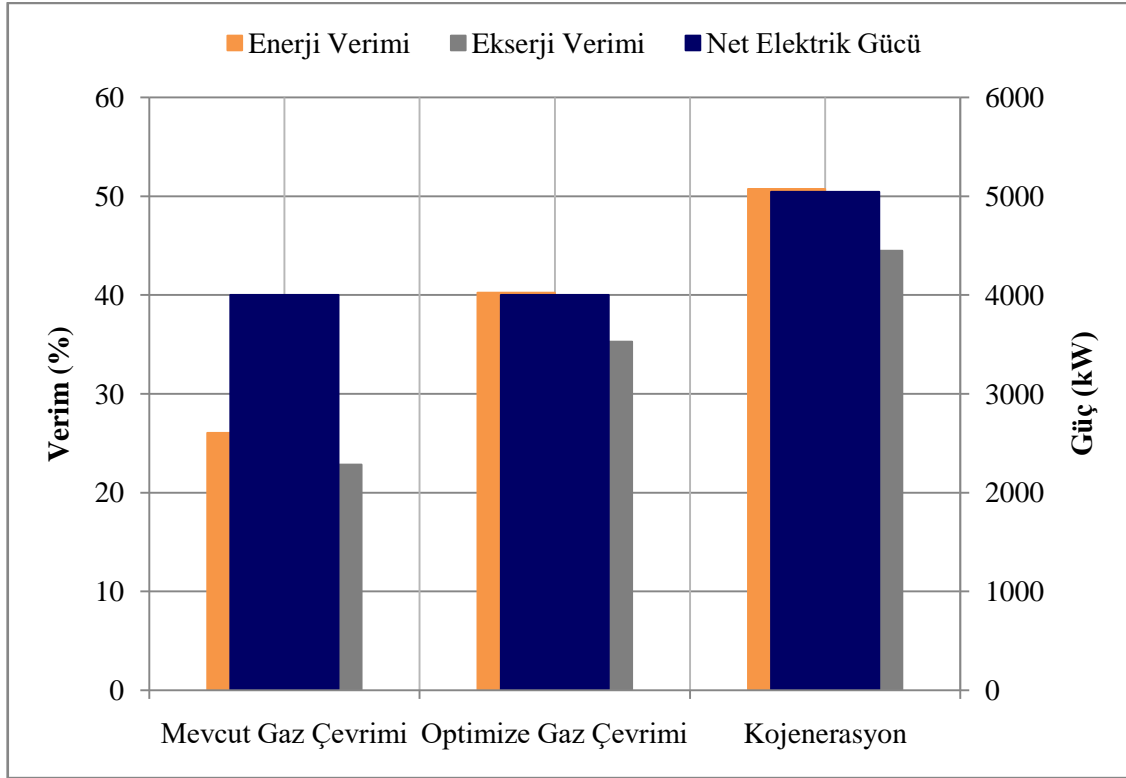


Şekil 9.3 Model 1 için HYO'ya bağlı olarak yakıt tüketiminin değişimi.

Çizelge 9.1'de Model 1 ve gaz çevrimi için termodinamik sonuçlar verilmiş ve Şekil 9.4'te Model 1'in termodinamik performans değişimi gösterilmiştir.

Çizelge 9.1 Model 1 ve mevcut gaz çevrimi için termodinamik sonuçlar.

	Mevcut Gaz Çevrimi	Model 1	Değişim (%)
η_{enerji} (%)	26.06	50.74	+24.68
η_{ekserji} (%)	22.84	44.47	+21.63
Yakıt Tüketimi (kg/s)	0.4797	0.3106	-35.25
Net Elektrik Gücü (kW)	4000	5043	+26.07



Şekil 9.4 Model 1'in termodinamik performans değişimi.

Çizelge 9.2'de Model 1 ve mevcut gaz çevrimi için termoeconomik sonuçlar verilmiştir. Optimizasyon sonucunda gaz çevriminin toplam ekserjetik kayıplarının azaltılması ve ORC ünitesinin atık enerji ile elektrik üretmesi sonucu mevcut gaz çevrimin birim elektrik maliyeti Model 1'de düşürülmüştür.

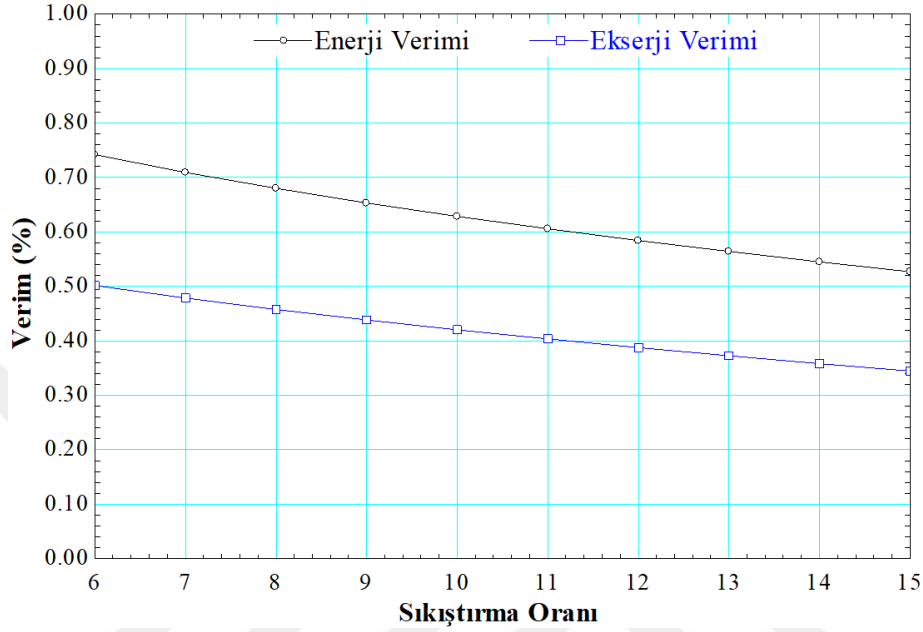
Çizelge 9.2 Model 1 ve mevcut gaz çevrimi için termoeconomik sonuçlar.

	Mevcut Gaz Çevrimi	Model 1	Değişim (%)
Ekserji Yıkımı (kW)	9520	5757.7	-39.52
Yakıt Maliyeti (\$/h)	346.77	224.55	-35.24
Birim Elektrik Maliyeti (\$/kWh)	0.04942	0.03778	-23.55

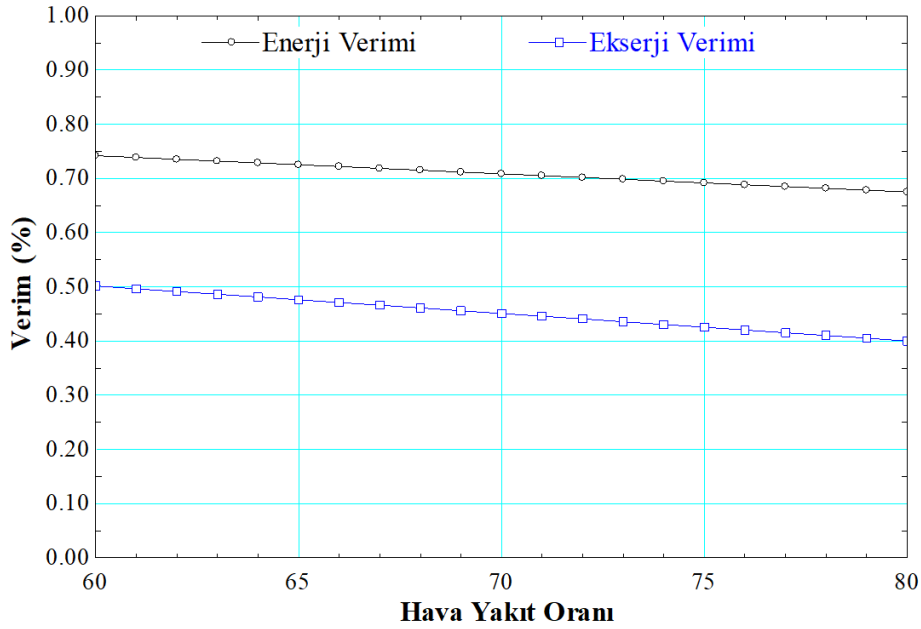
9.2 Model 2 İçin Optimizasyon Sonuçları

Şekil 9.5'te Model 2 için sıkıştırma oranının verimler üzerindeki etkisi ve Şekil 9.6'da Model 2 için HYO'nun verimler üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Model 2'de optimizasyonun amacı Model 1 ile benzer şekilde sabit 4000 kW güç çıkışını daha

verimli şekilde elde etmek olduğundan EES, HYO ve sıkıştırma oranını düşürerek yakıt tüketimini azaltmıştır. Bu durumda optimum HYO ve sıkıştırma oranı Model 1’de ki gibi sırasıyla 60 ve 6 olarak belirlenmiştir.



Şekil 9.5 Model 2 için sıkıştırma oranının verimler üzerindeki etkisi.



Şekil 9.6 Model 2 için HYO’nun verimler üzerindeki etkisi.

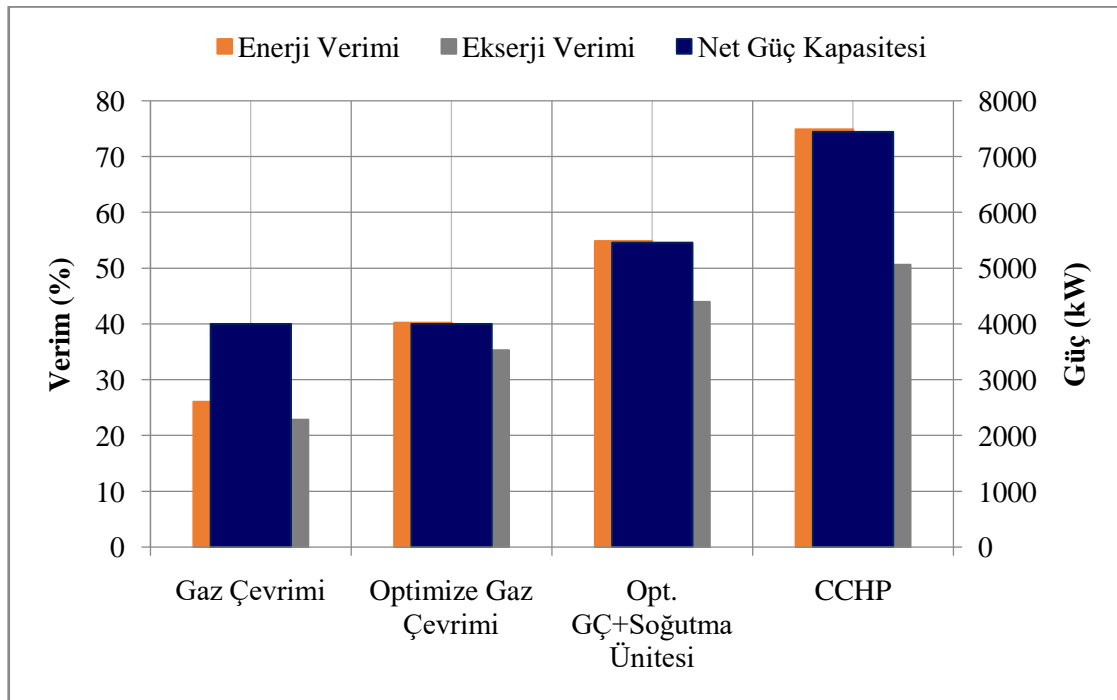
Model 2’nin parametrik optimizasyonu ve entegrasyonu sonucunda, ekipmanların

ekserji yıkımları azaltılmış ve atık egzoz gazı enerjisinden faydalanılarak verimler artırılmıştır. Çizelge 9.3'te Model 2 ve entegre edilen üniteler için termodinamik sonuçlar verilmiş ve Şekil 9.7'de Model 2'nin termodinamik performans değişimi gösterilmiştir.

Çizelge 9.3 Model 2 ve entegre edilen üniteler için termodinamik sonuçlar.

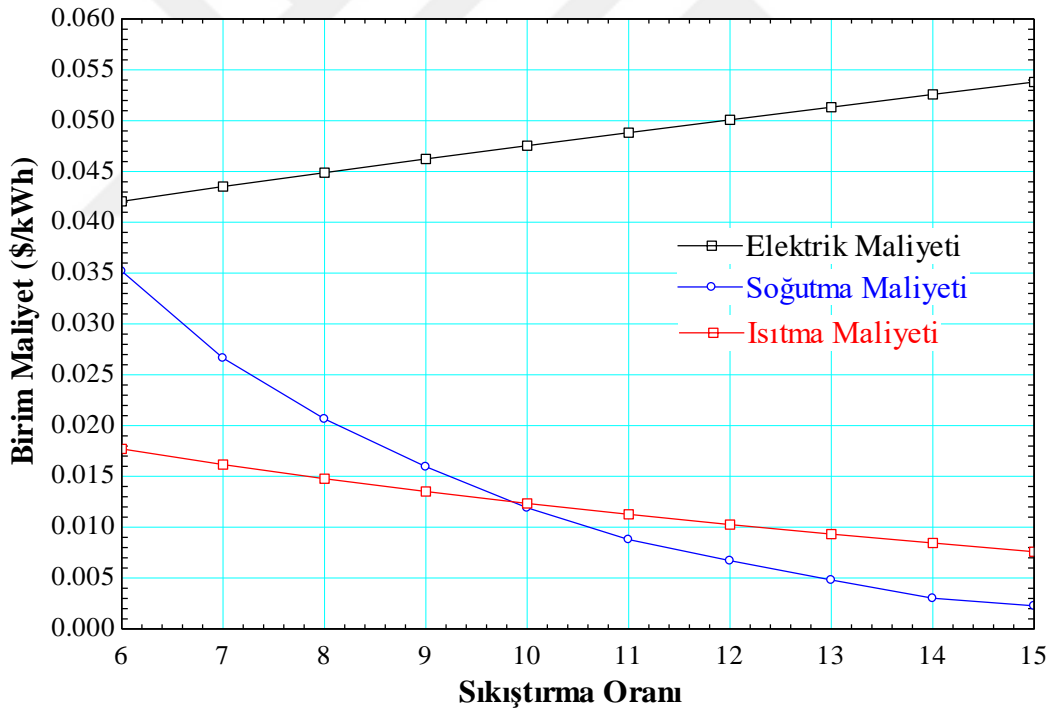
	η_{enerji} (%)	η_{ekserji} (%)
Gaz Çevrimi	26.03	22.84
Optimize Gaz Çevrimi	40.24	35.27
Optimize Gaz Çevrimi + Soğutma Ünitesi	54.89	43.94
Optimize Gaz Çevrimi + Soğutma Ünitesi + Isıtma Ünitesi	74.88	50.62

	Mevcut Gaz Çevrimi	Model 2	Değişim (%)
η_{enerji} (%)	26.06	74.88	+48.85
η_{ekserji} (%)	22.84	50.62	+27.28
Yakıt Tüketimi (kg/s)	0.4797	0.3107	-35.25
Net Güç Kapasitesi (kW)	4000	7444	+86.1

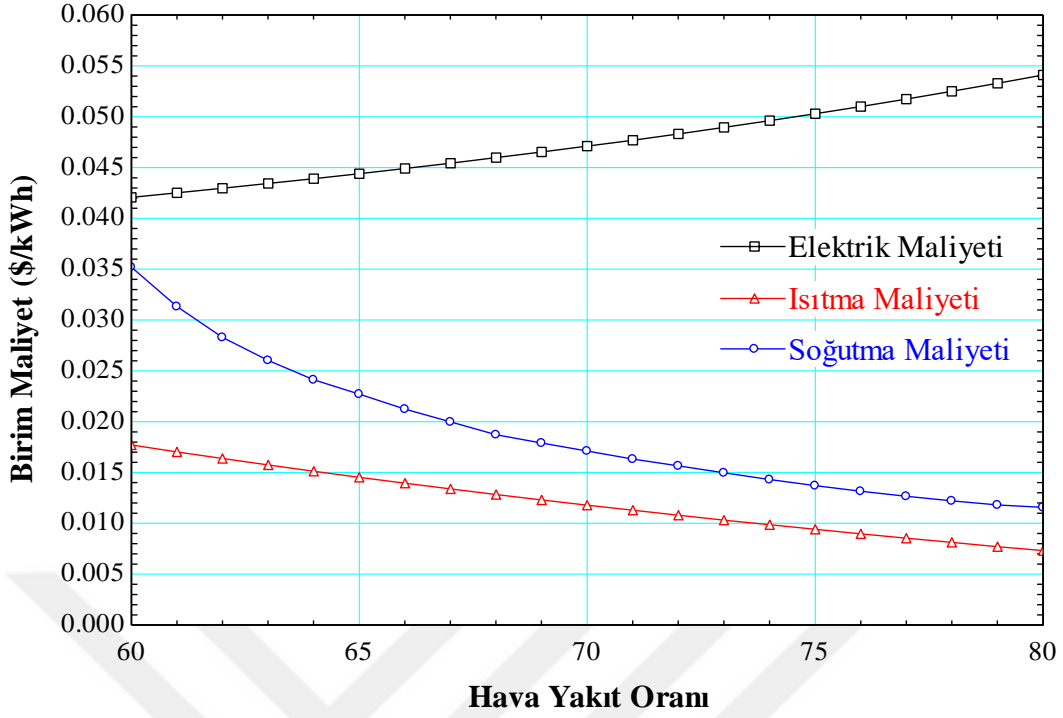


Şekil 9.7 Model 2'nin termodinamik performans değişimi.

Şekil 9.8’de Model 2 için sıkıştırma oranının birim maliyetler üzerindeki etkisi ve Şekil 9.9’da Model 2 için HYO’nun birim maliyetler üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Ekserji yıkımlarının azaltılmasıyla elektriğin birim maliyeti düşürülmüştür. Bu noktada ısıtma ve soğutma maliyetlerinin daha fazla düşürülebileceği ancak bu durumda elektrik maliyetinin artacağı bilinmelidir. Çünkü birim elektrik maliyeti ile birim ısıtma – soğutma maliyetleri zıt karakterlidir. Gaz çevriminin optimizasyonu, egzoz gazının enerjisini azalttığından ısıtma ve soğutma ünitelerinin performansı düşer. Bu durum elektrik maliyetinin düşmesine; diğer maliyetlerin artmasına sebep olur. Dolayısıyla hangi maliyetin odak noktası olup minimize edileceğine karar verilmelidir. Mantıklı bir seçim ünitelerin güç kapasitelerini karşılaştırmaktır. Gaz çevriminin elektrik üretim kapasitesi 4000 kW iken, ısıtma ve soğutma ünitelerinin kapasiteleri toplamı 3444 kW’tır. Bu yüzden birim elektrik maliyetinin minimize edilmiştir.

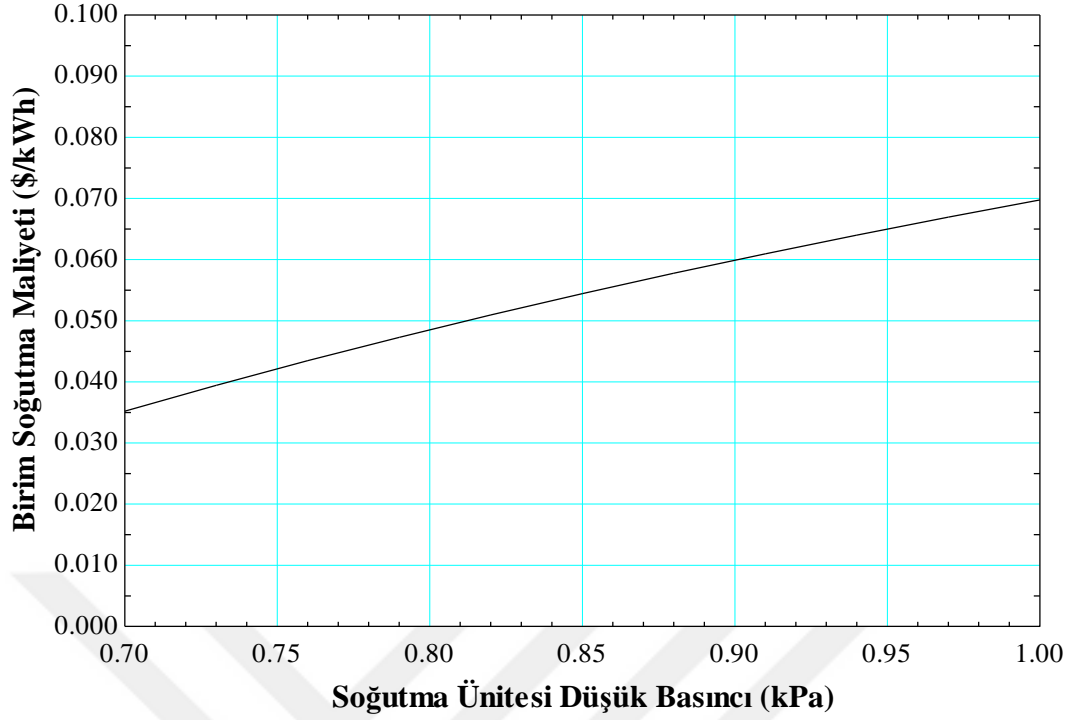


Şekil 9.8 Model 2 için sıkıştırma oranının birim maliyetler üzerindeki etkisi.



Şekil 9.9 Model 2 için HYO'nun birim maliyetler üzerindeki etkisi.

Soğutma ünitesinin parametrik optimizasyonunda soğutma ünitesinin düşük ve yüksek basınçları birim soğutma maliyetini düşürmek için optimize edilmiştir. Parametrik çalışma sonucunda soğutma ünitesi yüksek basıncının düşük seviyelerde olmasından dolayı soğutma maliyeti üzerinde ciddi bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Şekil 9.10'da Model 2 için soğutma ünitesi düşük basıncının birim soğutma maliyeti üzerindeki etkisi verilmiştir. Soğutma sisteminde LiBr ve su ayrıştıktan sonra suyun basıncının yüksek olması beklenmez. Genleşme valfinde suyun düşük basınçlara genleşmesi, evaporatörde mahal suyu soğutma işleminin daha verimli gerçekleşmesini sağlar. Şekle göre soğutma ünitesi düşük basıncı azaldıkça soğutma performansı arttığından birim soğutma maliyeti düşer.



Şekil 9.10 Model 2 için soğutma ünitesi düşük basıncının birim soğutma maliyetine etkisi.

Çizelge 9.4'te Model 2 ve mevcut gaz çevrimi için termoeconomik sonuçlar verilmiştir. Optimizasyon sonucunda azaltılan ekserjetik kayıplar sebebiyle mevcut gaz çevrimine göre Model 2'de birim elektrik maliyeti daha düşüktür.

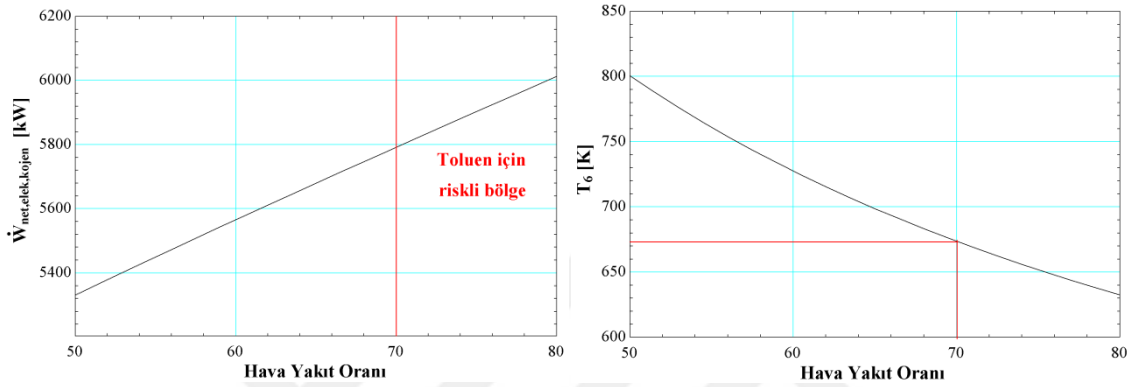
Çizelge 9.4 Model 2 ve mevcut gaz çevrimi için termoeconomik sonuçlar.

	Mevcut Gaz Çevrimi	Model 2	Değişim (%)
Ekserji Yıkımı (kW)	9520	6621	-30.45
Yakıt Maliyeti (\$/h)	346.77	224.55	-35.24
Birim Elektrik Maliyeti (\$/kWh)	0.04942	0.04176	-15.5
Birim Soğutma Maliyeti (\$/kWh)	-	0.03526	-
Birim Isıtma Maliyeti (\$/kWh)	-	0.01783	-

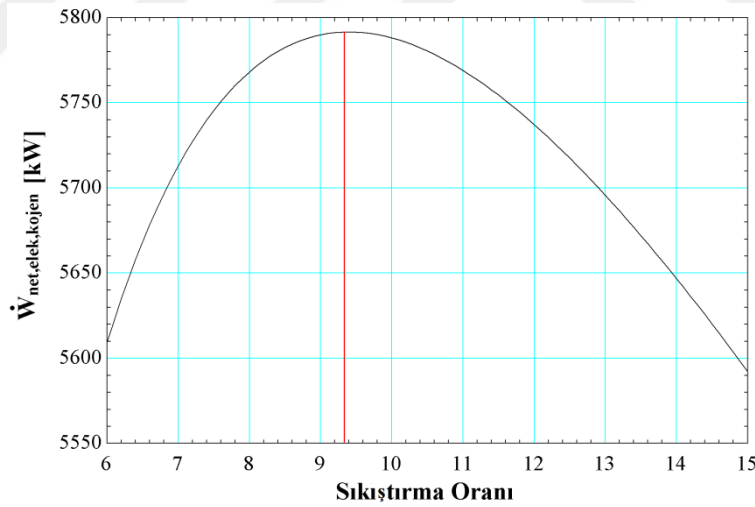
9.3 Model 3 İçin Optimizasyon Sonuçları

Model 3, diğer modellerden farklı olarak güç çıktısını maksimize etmek için optimize edilmiştir. Şekil 9.11'de Model 3 için HYO'nun santral gücüne etkisi ve Şekil 9.12'de Model 3 için sıkıştırma oranının santral gücüne etkisi gösterilmiştir. Optimizasyon sonucunda EES gaz çevriminin optimum HYO ve sıkıştırma oranını sırasıyla 70 ve

9.393 olarak belirlemiştir. Şekil 9.11’de HYO’nun artışıyla santralin gücü artış göstermektedir. Ancak HYO’nun artmasıyla ORC ünitesini tahrik eden egzoz gazının T_6 sıcaklığı düşmektedir. 70’den büyük HYO değerlerinde T_6 sıcaklığı aşırı düşeceğinden ORC ünitesinde toluen buharlaştırılmaz. Dolayısıyla bu bölge toluen için riskli bölgedir. Şekil 9.12’de ise 9.393 değeri kompresörün kritik değeridir ve daha yüksek sıkıştırma oranlarında santral gücü düşer.

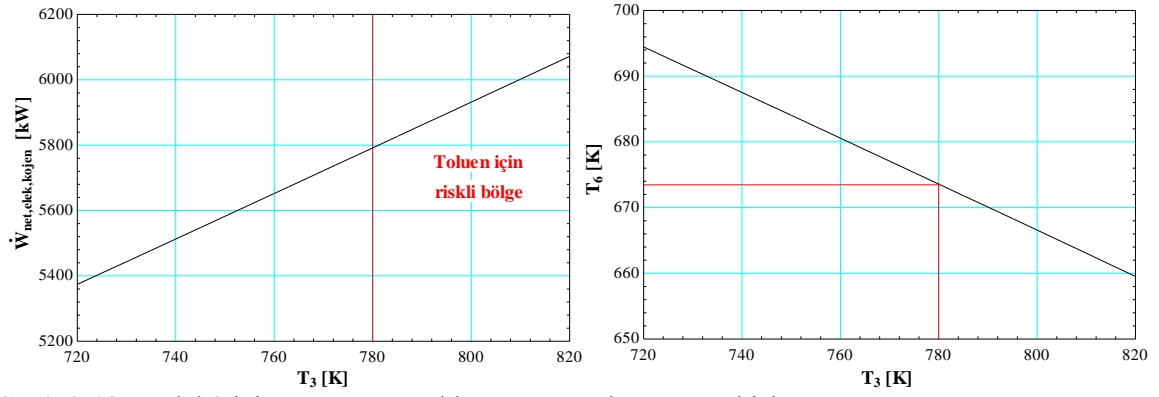


Şekil 9.11 Model 3 için HYO’nun santral gücüne etkisi.



Şekil 9.12 Model 3 için sıkıştırma oranının santral gücüne etkisi.

Şekil 9.13’te Model 3 için ön ısıtıcı sıcaklığının santral gücüne etkisi verilmiştir. Şekilde ön ısıtıcı sıcaklığı arttıkça santral gücü artmaktadır. Ancak T_3 sıcaklığının artışıyla T_6 egzoz sıcaklığı düşer. Şekil 9.11’de olduğu gibi T_3 ’ün 780 K’den yüksek seviyelerinde T_6 egzoz gazı sıcaklığı aşırı düştüğünden ORC ünitesinde toluen buharlaştırılmaz. Bu yüzden 780 K’nin üzerindeki ön ısıtıcı sıcaklıkları riskli bölgedir.

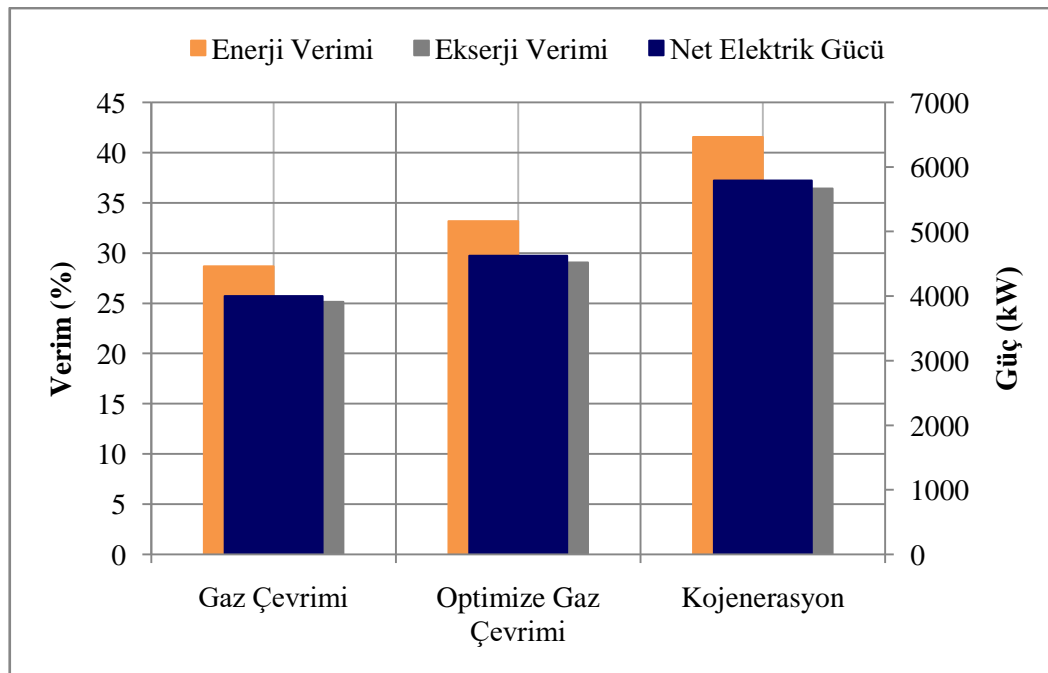


Şekil 9.13 Model 3 için ön ısıtıcı sıcaklığının santral gücüne etkisi.

Çizelge 9.5'te Model 3 ve mevcut gaz çevriminin termodinamik sonuçları verilmiş ve Şekil 9.14'te Model 3'ün termodinamik performans değişimi gösterilmiştir.

Çizelge 9.5 Model 3 ve mevcut gaz çevrimi için termodinamik sonuçlar.

	Mevcut Gaz Çevrimi	Model 3	Değişim (%)
η_{enerji} (%)	28.69	41.55	+12.86
η_{ekserji} (%)	25.15	36.42	+11.27
Yakıt Tüketimi (kg/s)	0.263	0.263	0
Net Elektrik Gücü (kW)	4000	5792	+44.8



Şekil 9.14 Model 3'ün termodinamik performans değişimi.

Çizelge 9.6’da Model 3 ve mevcut gaz çevrimi için termoekonomik sonuçlar verilmiştir. Optimizasyon sonucunda gaz çevriminin toplam ekserjetik kayıplarının azaltılması ve ORC ünitesinin atık enerji ile elektrik üretmesi sonucu mevcut gaz çevrimin birim elektrik maliyeti Model 3’te düşürülmüştür. Ayrıca, Model 3’te ekserji yıkımının mevcut gaz çevrimine göre yüksek olmasının sebebi, ORC ünitesinin entegrasyonu sonucu toplam ekserji yıkımının artmasıdır.

Çizelge 9.6 Model 3 ve mevcut gaz çevrimi için termoekonomik sonuçlar.

	Mevcut Gaz Çevrimi	Model 3	Değişim (%)
Ekserji Yıkımı (kW)	7916	8786.51	+10.99
Yakıt Maliyeti (\$/h)	314.9	314.9	0
Birim Elektrik Maliyeti (\$/kWh)	0.04323	0.03922	-9.27

10. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tezde, Afyonkarahisar’da bulunan ve tavuk gübresinden biyogaz üreten 4000 kW net güç kapasiteli Afyon Enerji – Gübre Santralinin termodinamik modellemesi yapılarak santral termodinamik ve termoeconomik açıdan analiz edilmiştir. Analizler EES ve Aspen Plus’ta, optimizasyon ise EES’de gerçekleştirilmiştir. Mevcut santralin atık egzoz gazı yüksek enerjiye sahiptir ve çevre için oldukça zararlıdır. Bu enerjiden faydalanarak santralin güç kapasitesini artırmak hem verim açısından hem de çevre açısından faydalı olacaktır. Bu amaçla üç farklı termodinamik model geliştirilmiştir.

Model 1, mevcut gaz çevrimi ve bir ORC ünitesinden oluşmaktadır ve kojenere halde termoeconomik açıdan çok boyutlu optimize edilmiştir. Mevcut santralde olduğu gibi Model 1’de de %60 CH₄ – %40 CO₂ karışımı biyogaz enerji kaynağı olarak kullanılır. Bu modelde optimizasyonun amacı sabit 4000 kW net elektrik gücü ile birim elektrik maliyetini minimize etmektir.

Model 2, mevcut gaz santral ve birer ısıtma – soğutma ünitesinden oluşmaktadır ve termoeconomik açıdan parametrik optimizasyonla optimize edilmiştir. EES’nin akademik versiyonunda Genetic yöntem kullanılmadığından parametrik optimizasyon yöntemi tercih edilmiştir. Mevcut santralde olduğu gibi Model 2’de %60 CH₄ – %40 CO₂ karışımı biyogazı enerji kaynağı olarak kullanır. Modelde optimizasyonun amacı sabit 4000 kW net elektrik gücü ile birim elektrik, ısıtma ve soğutma maliyetlerini minimize etmektir.

Model 3, mevcut gaz santrali, bir ORC ünitesi ve bir elektroliz ünitesinden oluşmaktadır ve kojenere halde termodinamik açıdan çok boyutlu optimize edilmiştir. Ayrıca ORC’de üretilen elektrik, elektroliz ünitesinde suyun elektrolizi ile hidrojen üretmek için kullanılmıştır. Diğer modellerde biyogaz içindeki CO₂’nin bu modelde biyogazdan ayrıştırıldığı ve biyogazın %100 CH₄’ten meydana geldiği kabul edilmiştir. CHP sistemde optimizasyonun amacı 0.263 kg/s sabit yakıt tüketimi ile kojenere sistemin ürettiği elektrik kapasitesini maksimize etmektir.

EES’de tasarlanan her bir model Aspen Plus’ta da tasarlanmıştır. Aspen Plus biyogaz santralleri için geliştirilmiş ve günümüzde bu konuda en çok bilinen yazılımdır. Güncel dataları kullanarak gerçekçi bir yaklaşım ile analiz yapar. Termodinamik analiz sonucunda modellerin EES ve Aspen Plus tasarımları arasında neredeyse farklılık olmadığı görülmüştür. Bu durum modellerin gerçekçiliğini ve uygulanabilirliğini desteklemektedir.

Çizelge 10.1’de tasarlanan modellerin önemli karşılaştırmalı termodinamik, termoekonomik ve ekonomik değerleri verilmiştir. Çizelge bu çalışmada elde edilen sonuçların özetidir ve çalışmanın tamamı hakkında anahtar bilgiler sunmaktadır.



Çizelge 10.1 Tasarlanan modellerin karşılaştırmalı termodinamik, termoekonomik ve ekonomik değerleri.

	Model 1			Model 2			Model 3		
	Mevcut	Model 1	Değişim (%)	Mevcut	Model 2	Değişim (%)	Mevcut	Model 3	Değişim (%)
	Gaz Çevrimi			Gaz Çevrimi			Gaz Çevrimi		
η_{enerji} (%)	26.06	50.74	+24.68	26.06	74.88	+48.85	28.69	41.55	+12.86
η_{ekserji} (%)	22.84	44.47	+21.63	22.84	50.62	+27.28	25.15	36.42	+11.27
Yakıt Tüketimi (kg/s)	0.4797	0.3106	-35.25	0.4797	0.3107	-35.25	0.263	0.263	0
Net Güç Kapasitesi (kW)	4000	5043	+26.07	4000	7444	+86.1	4000	5792	+44.8
Egzoz Gazı Sıcaklığı (K)	626.4	384.7	-38.58	626.4	384.7	-38.58	829.6	473.6	-42.91
Yakıt Maliyeti (\$/h)	346.77	224.55	-35.24	346.77	224.55	-35.24	314.9	314.9	0
Ekserji Yıkımı (kW)	9520	5757.7	-39.52	9520	6621	-30.45	7916	8786.51	+10.99
Toplam Yatırım Maliyeti (\$)		16 482 100			16 759 800			22 314 830	
Birim Elektrik Maliyeti (\$/kWh)	0.04942	0.03778	-23.55	0.04942	0.04176	-15.5	0.04323	0.03922	-9.27
Birim Soğutma Maliyeti (\$/kWh)					0.03526				
Birim Isıtma Maliyeti (\$/kWh)					0.01783				
Birim Hidrojen Maliyeti (\$/kg)								3.191	

Tasarlanan modeller birçok ihtiyaca cevap vermektedir. Model 1 ile ucuz bir elektrik üretimi yapılabilir, Model 2 ile ucuz ısıtma ve soğutma yapılabilir, Model 3 ile yüksek kapasitede elektrik gücü üretilebilir. Bu çalışmada Model 3'te ORC ünitesinde üretilen yüksek seviyedeki güç ile hidrojen üretimi yapılmıştır. Modellerden hangisi seçilirse seçilsin, mevcut santralin termodinamik ve termoeconomik yönden iyileşeceği ve çevreye daha az zarar vereceği açıktır.

Bununla birlikte her modelde görülen ortak sorun ise yanma reaksiyonu sonucu yanma odasında açığa çıkan büyük seviyedeki ekserji yıkımlarıdır. Yenilenebilir enerji teknolojileri arasında, biyoenerjinin yakıt pilleriyle kojenerasyon sisteminde kullanılması, enerji tüketimini azaltabilen en ilgi çekici seçeneklerden biridir. Çevre dostu, yüksek verimli ve sessiz bir teknolojidir. Ayrıca az sayıda hareketli parçaya sahiptir. Bu bakımdan CHP ve CCHP sistemleri için idealdir (Salehi vd. 2019, Pirkandi vd. 2012).

Biyogazda bulunan metan oranının artması da santral performansını artıracaktır. Biyogaz üretiminde pH, atık içeriği, C/N oranı ve reaktör sıcaklığı metan oranını etkileyen en önemli faktörlerdir. Lipitlerin atık olarak kullanılması, 25 – 30 C/N oranı, 6.8 – 7.5 pH değeri ve yüksek sıcaklıklar metan oranını artırır. Bununla birlikte tavuk gübresinden anaerobik çürütme ile biyogaz üretimindeki temel sorun, biyogazın inhibisyonuna yol açabilecek toksik bileşik varlığıdır. Tavuğun beslenmesi konusunda bilgi eksikliği, tavuğa verilen antibiyotiklerin gerekli dozu aşmasına ve gübrede yüksek miktarda antibiyotik kalmasına neden olmaktadır. Antibiyotikler, ağır metaller gibi farklı toksik bileşiklerin tavuk gübresinin anaerobik sindirimi üzerindeki etkisi hakkında az şey bilinmektedir. İlgili çalışma oldukça talep görmektedir. Ayrıca tavuk gübresinin anaerobik sindirimi sırasında amonyak üretimi yüksektir ve amonyak çürütücüdeki mikroorganizmalar için toksiktir. Bu noktada tavuk gübresinin tek başına çürütülmesi yerine karbonca zengin bir atıkla eş çürütülmesi enerji tasarrufu sağlar (Chen vd 2021).

10.1 Validasyon

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçların bilim dünyasında kabul görmesi için bilim

dünyasında ki mevcut çalışmalara göre olumlu yönlerinin olması gereklidir. Bunun için literatürde yapılan bazı önemli çalışmalar burada sunulmuştur.

Coşkun ve Al – Talabani (2017), doğal gazla çalışan gaz türbini tabanlı bir kojenerasyon santralinin enerji ve ekserji analizini yaptılar. Analiz, santralden alınan anlık bilgiler kullanılarak EES yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre enerji ve ekserji verimi sırasıyla %32.8 ve %43.4 olarak belirlenmiş ve en yüksek ekserji yıkımının yanma odasında meydana geldiği görülmüştür (Coşkun ve Al – Talabani 2017).

Zahedi vd. (2021), buhar çevrimi, ORC, biyogaz brayton çevrimi ve solar brayton çevrimini içeren konfigürasyonu EES ve MATLAB’da enerji, ekserji, eksergoekonomi ve çevresel açıdan optimize ederek analiz etmişlerdir. Analiz sonucunda, birim elektrik maliyetini 0.0636 \$/kWh olarak hesaplamışlar ve entegre edilen ORC ile santralin enerji ve ekserji verimi sırasıyla %2.2 ve %2.3 artmıştır (Zahedi vd. 2021).

Gholizadeh vd. (2019), %60 CH₄ – %40 CO₂’den oluşan biyogazla çalışan bir gaz çevrimine temel ve modifiye edilmiş olmak üzere iki ORC entegre etmişlerdir. Sonuçlara göre modifiye edilmiş ORC entegrasyonu daha iyi performans göstermiştir. Modifiye edilmiş ORC entegrasyonu ile enerji ve ekserji verimi sırasıyla %11.3 ve %10.5 yükselmiş ve birim elektrik maliyeti 0.0619 \$/kWh olmuştur (Gholizadeh vd. 2019).

Khanmohammadi vd. (2015), biyokütle gazlaştırıcı ünitesi ve bir gaz çevrimine ORC ünitesi entegre ederek santrali termodinamik ve termoekonomik açıdan analiz etmişlerdir. Sıkıştırma oranı, yanma sıcaklığı, gazlaştırma sıcaklığı, türbin çıkış sıcaklığı, kompresör izentropik verimi, türbin izentropik verimi ve ORC yüksek basıncı olmak üzere yedi parametrenin optimizasyonunu yapmışlardır. Analiz sonuçlarına göre ORC entegrasyonu ile enerji ve ekserji veriminde sırasıyla %1.6 ve %2.4 artış olurken birim elektrik maliyeti 0.0455 \$/kWh olarak hesaplanmıştır (Khanmohammadi vd. 2015).

11. KAYNAKLAR

- Abuşoğlu A, Demir S, Kanoğlu M, 2013, Biyogaz Beslemeli Gaz Motorlu Bir Kojenerasyon Sisteminin Termoeekonomik Analizi, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 33, 9 – 21.
- Afyon Biyogaz Elektrik Üretim Şir., 2016, Afyon – 1 Biyogaz Elektrik Üretim Santrali Çevre Etki Değerlendirme Raporu, 18.
- Aghei A T, Saray R K, 2021, Optimization of a combined cooling, heating, and power (CCHP) system with a gas turbine prime mover: A case study in the dairy industry, Energy, 229, 120788.
- Ai T, Chen H, Jia J, Song Y, Zhong F, Yang S, Xue G, 2022, Thermodynamic analysis of a CCHP system integrated with a regenerative organic flash cycle, Applied Thermal Engineering, 202, 117833.
- Aspen Plus V11. (2022). Engineering Economic Analysis Library.
- Baltrėnas P, Kolodynski V, Urbanas D, 2019, Biogas production from chicken manure at different organic loadings using a special zeolite additive (ZeoVit sorbent), Journal of Renewable and Sustainable Energy, 11, 063101, doi: 10.1063/1.5119840.
- Barzegaravval H, Hosseini S E, Wahid M A, Saat A, 2018, Effects of fuel composition on the economic performance of biogas – based power generation systems, Applied Thermal Engineering, 128, 1543 – 1554.
- Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M, 1995, Thermal Design and Optimization, A Wiley – Interscience Publication John Wiley & Sons, Inc., New York / Chichester / Brisbane / Toronto / Singapore.
- BEPA, 2022, Ekonomik Enerji Hesaplama Modülü, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü resmi sitesi, <https://bepa.enerji.gov.tr/>, 28.03.2022.
- Benato A, Macor A, 2017, Biogas Engine Waste Heat Recovery Using Organic Rankine Cycle, Energies, 10, 327, doi:10.3390/en10030327.
- Canan A, 2021, Biyogaz Üretiminde Farklı Katkı Maddelerinin Biyogaz Verimine Etkisinin İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doktora Tezi, Karabük.

- Cao Y, Dhahad H A, Togun H, Haghghi M A, Anqi A E, Farouk N, Rosen M A, 2021, Seasonal design and multi – objective optimization of a novel biogas – fueled cogeneration application, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 21822 – 21843.
- Castelli A F, Elsidio C, Scaccabarozzi R, Nord L O, Martelli E, 2019, Optimization of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery From Aluminum Production Plants, *Frontiers in Energy Research*, 7, 44, doi: 10.3389/fenrg.2019.00044.
- Chen J, Li J, Ye B, Zhang X, Tyagi R D, Gao X, Energy balance assessment on chicken manure for biogas production in Rabat – Salè – Zemmour – Zaïr of Morocco, *Journal of Environmental Management*, 299, 113656.
- Coşkun A, Al – Talabani M G H, 2017, Bir Kombine Çevrim Santralinin Ekserji Analizi, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 5, 537 – 545, DOI: 10.21923/jesd.290766.
- Dalkılıç K, Ugurlu A, 2015, Biogas production from chicken manure at different organic loading rates in a mesophilic – thermophilic two stage anaerobic system, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 120, 315 – 322.
- Demir S, 2012, Thermodynamic and Thermo-economic Analysis and Optimization of Biogas Usage in Electricity and Hydrogen Productions From Wastewater Treatment Systems, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Gaziantep.
- Doseva N, Chakyrova D, 2015, Energy and Exergy Analysis of Cogeneration System With Biogas Engines, *Journal of Thermal Engineering*, 1, 391 – 401.
- Dumont O, Dickes R, Rosa M D, Douglas R, Lemort V, Technical and economic optimization of subcritical, wet expansion and transcritical Organic Rankine Cycle (ORC) systems coupled with a biogas power plant, *Energy Conversion and Management*, 157, 294 – 306.
- ELDER, 2022, 2022 Yılı Cumhurbaşkanlığı Yıllık Programı Enerji Sektörü Özet Raporu, www.elder.org.tr, 28.03.2022.
- Ergür H S, Okumuş F, 2010, Cost and Potential Analysis of Biogas in Eskişehir, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik – Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15.

- Fakkaew K, Polprasert C, 2021, Air stripping pre – treatment process to enhance biogas production in anaerobic digestion of chicken manure wastewater, *Bioresource Technology Reports*, 14, 100647.
- Fuchs W, Wang X, Gabauer W, Ortner M, Li Z, 2018, Tackling ammonia inhibition for efficient biogas production from chicken manure: Status and technical trends in Europe and China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 186 – 199.
- Garg P, Kumar P, Srinivasan K, Dutta P, 2013, Evaluation of carbon dioxide blends with isopentane and propane as working fluids for organic Rankine cycles, *Applied Thermal Engineering*, 52, 439 – 448.
- Gargari S G, Rahimi M, Ghaebi H, 2019, Energy, exergy, economic and environmental analysis and optimization of a novel biogas – based multigeneration system based on Gas Turbine – Modular Helium Reactor cycle, *Energy Conversion and Management*, 185, 816 – 835.
- Ghaebi H, Yari M, Gargari S G, Rostamzadeh H, 2019, Thermodynamic modeling and optimization of a combined biogas steam reforming system and organic Rankine cycle for coproduction of power and hydrogen, *Renewable Energy*, 130, 87 – 102.
- Ghamari V, Hajabdollahi H, Dehaj M S, 2021, Comparison of gas turbine and diesel engine in optimal design of CCHP plant integrated with multi – effect and reverse osmosis desalinations, *Process Safety and Environmental Protection*, 154, 505 – 518.
- Gholizadeh T, Vajdi M, Mohammadkhani F, 2019, Thermodynamic and thermoeconomic analysis of basic and modified power generation systems fueled by biogas, *Energy Conversion and Management*, 181, 463 – 475.
- Gunaseelan V N, 1997, Anaerobic Digestion of Biomass for Methane Production: A Review, *Biomass and Bioenergy*, 13, 83 – 114.
- Hajizadeh A, Baghmolaei M M, Saady N M C, Zendehboudi S, 2022, Hydrogen production from biomass through integration of anaerobic digestion and biogas dry reforming, *Applied Energy*, 309, 118442.

- Hakimi M, Shamsuddin R, Pendyala R, Siyal A A, AlMohamadi H, 2021, Co – anaerobic digestion of chicken manure with the addition of *Cymbopogon citratus*, *Mentha piperita* and *Citrus sinensis* as fly deterrent agents: Biogas production and Kinetic study, *Bioresource Technology Reports*, 15, 100748.
- Hosseini S E, 2020, Design and analysis of renewable hydrogen production from biogas by integrating a gas turbine system and a solid oxide steam electrolyzer, *Energy Conversion and Management*, 211, 112760.
- Hosseini S E, Barzegaravval H, Wahid M A, Ganjehkaviri A, Sies M M, 2016, Thermodynamic assessment of integrated biogas – based micro – power generation system, *Energy Conversion and Management*, 128, 104 – 119.
- Ibrahim N I, Al – Sulaiman F A, Rehman S, Saat A, Ani F N, 2021, Economic analysis of a novel solar-assisted air conditioning system with integral absorption energy storage, *Journal of Cleaner Production*, 291, 125918.
- Imamović B, Halilčević S S, Georgilakis P S, 2022, Comprehensive fuzzy logic coefficient of performance of absorption cooling system, *Expert Systems With Applications*, 190, 116185.
- Jarrar L, Ayadi O, Al Asfar J, 2020, Techno – economic Aspects of Electricity Generation from a Farm Based Biogas Plant, *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 8, 476 – 492.
- Jijia S, Siripatana C, 2017, Kinetic Model of Biogas Production from Co – digestion of Thai Rice Noodle Wastewater (Khanomjeen) with Chicken Manure, *Energy Procedia*, 138, 386 – 392.
- Jurgutis L, Slepeliene A, Volungevicius J, Volunge K A, 2020, Biogas production from chicken manure at different organic loading rates in a mesophilic full scale anaerobic digestion plant, *Biomass and Bioenergy*, 141, 105693.
- Kara B, Emir Z, Seker T, Bahadir A, Kaygusuz K, 2017, Current state and future prospects of biomass energy in Turkey, *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 6, 522 – 529.
- Khanmohammadi S, Atashkari K, Kouhikamali R, 2015, Exergoeconomic multi – objective optimization of an externally fired gas turbine integrated with a biomass gasifier, *Applied Thermal Engineering*, 91, 848 – 859.

- Khoshgoftar Manesh M H, Rezazadeh A, Kabiri S, 2020, A feasibility study on the potential, economic, and environmental advantages of biogas production from poultry manure in Iran, *Renewable Energy*, 159, 87 – 106.
- Kim J, Qi M, Kim M, Lee J, Lee I, Moon I, 2022, Biogas reforming integrated with PEM electrolysis via oxygen storage process for green hydrogen production: From design to robust optimization, *Energy Conversion and Management*, 251, 115021.
- Koc Y, Kose O, Yagli H, 2019, Exergy analysis of a natural gas fuelled gas turbine based cogeneration cycle, *International Journal of Exergy*, 30.
- Köse Ö, Koç Y, Yağlı H, 2020, Performance improvement of the bottoming steam Rankine cycle (SRC) and organic Rankine cycle (ORC) systems for a triple combined system using gas turbine (GT) as topping cycle, *Energy Conversion and Management*, 211, 112745.
- Leonzio G, 2018, An innovative trigeneration system using biogas as renewable energy, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 26, 1179 – 1191.
- Li R, Duan N, Zhang Y, Liu Z, Li B, Zhang D, Lu H, Dong T, 2017, Co – digestion of chicken manure and microalgae *Chlorella* 1067 grown in the recycled digestate: Nutrients reuse and biogas enhancement, *Waste Management*, 70, 247 – 254.
- Lin K W, Wu H W, 2020, Hydrogen – rich syngas production and carbon dioxide formation using aqueous urea solution in biogas steam reforming by thermodynamic analysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 11593 – 11604.
- Long N V D, Kim G S, Tran N N, Lee D Y, Fulcheri L, Song Z, Sundmacher K, Lee M, Hessel V, 2021, Biogas upgrading using ionic liquid [Bmim][PF₆] followed by thermal – plasma – assisted renewable hydrogen and solid carbon production, *International Journal of Hydrogen Energy*, In Press.
- Madeira J G F, Oliveira E M, Springer M V, Cabral H L, Barbeito D F D C, Souza A P G, Moura D A D S, Delgado A R S, 2021, Hydrogen production from swine manure biogas via steam reforming of methane (SRM) and water gas shift (WGS): A ecological, technical, and economic analysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 8961 – 8971.

- Mehr A S, Mahmoudi S M S, Yari M, Chitsaz A, 2015, Thermodynamic and exergoeconomic analysis of biogas fed solid oxide fuel cell power plants emphasizing on anode and cathode recycling: A comparative study, *Energy Conversion and Management*, 105, 596 – 606.
- Melikoglu M, Menekse Z K, 2020, Forecasting Turkey's cattle and sheep manure based biomethane potentials till 2026, *Biomass and Bioenergy*, 132, 105440.
- Minutillo M, Perna A, Sorce A, 2020, Green hydrogen production plants via biogas steam and autothermal reforming processes: energy and exergy analyses, *Applied Energy*, 277, 115452.
- Norani M, Deymi – Dashtebayaz M, 2022, Energy, exergy and exergoeconomic optimization of a proposed CCHP configuration under two different operating scenarios in a data center: Case study, *Journal of Cleaner Production*, 342, 130971.
- Pan M, Lu F, Zhu Y, Huang G, Yin J, Huang F, Chen G, Chen Z, 2020, Thermodynamic, exergoeconomic and multi – objective optimization analysis of new ORC and heat pump system for waste heat recovery in waste – toenergy combined heat and power plant, *Energy Conversion and Management*, 222, 113200.
- Parikhani T, Azariyan H, Behrad R, Ghaebi H, Jannatkhah J, 2020, Thermodynamic and thermoeconomic analysis of a novel ammoniawater mixture combined cooling, heating, and power (CCHP) cycle, *Renewable Energy*, 145, 1158 – 1175.
- Park M J, Kim J H, Lee Y H, Kim H M, Jeong D W, 2020, System optimization for effective hydrogen production via anaerobic digestion and biogas steam reforming, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 30188 – 30200.
- Peng M Y P, Chen C, Peng X, Marefati M, 2020, Energy and exergy analysis of a new combined concentrating solar collector, solid oxide fuel cell, and steam turbine CCHP system, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 39, 100713.
- Phan T S, Minh D P, Espitalier F, Nzihou A, Grouset D, 2022, Hydrogen production from biogas: Process optimization using ASPEN Plus®, *International Journal of Hydrogen Energy*, In Press.

- Pirkandi J, Ghassemi M, Hamed M H, Mohammadi R, 2012, Electrochemical and thermodynamic modeling of a CHP system using tubular solid oxide fuel cell (SOFC – CHP), *Journal of Cleaner Production*, 29 – 30, 151 – 162.
- Rostamzadeh H, Gargari S G, Namin A S, Ghaebi H, 2018, A novel multigeneration system driven by a hybrid biogas – geothermal heat source, Part I: Thermodynamic modeling, *Energy Conversion and Management*, 177, 535 – 562.
- Salehi A, Mousavi S M, Fasihfar A, Ravanbakhsh M, 2019, Energy, exergy, and environmental (3E) assessments of an integrated molten carbonate fuel cell (MCFC), Stirling engine and organic Rankine cycle (ORC) cogeneration system fed by a biomass – fueled gasifier, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 31488 – 31505.
- Scaccabarozzi R, Tavano M, Invernizzi C M, Martelli E, 2018, Comparison of working fluids and cycle optimization for heat recovery ORCs from large internal combustion engines, *Energy*, 158, 396 – 416.
- Sevinchan E, Dincer I, Lang H, 2019, Energy and exergy analyses of a biogas driven multigenerational system, *Energy*, 166, 715 – 723.
- Shen J, Zhao C, Liu Y, Zhang R, Liu G, Chen C, 2019, Biogas production from anaerobic co – digestion of durian shell with chicken, dairy, and pig manures, *Energy Conversion and Management*, 198, 110535.
- Skorek – Osikowska A, Martín – Gamboa M, Iribarren D, García – Gusano D, Dufour J, 2020, Thermodynamic, economic and environmental assessment of energy systems including the use of gas from manure fermentation in the context of the Spanish potential, *Energy*, 200, 117452.
- Stark M, Conti F, Saidi A, Zoerner W, Greenough R, 2019, Steam storage systems for flexible biomass CHP plants – Evaluation and initial model based calculation, *Biomass and Bioenergy*, 128, 105321.
- Su B, Han W, Zhang X, Chen Y, Wang Z, Jin H, 2018, Assessment of a combined cooling, heating and power system by synthetic use of biogas and solar energy, *Applied Energy*, 229, 922 – 935.

- Sukpancharoen S, Phetyim N, 2021, Green hydrogen and electrical power production through the integration of CO₂ capturing from biogas: Process optimization and dynamic control, *Energy Reports*, 7, 293 – 307.
- Tańczuk M, Junga R, Kolasa – Wiecek A, Niemiec P, 2019, Assessment of the Energy Potential of Chicken Manure in Poland, *Energies*, 12, 1244, doi:10.3390/en12071244.
- Tozlu A, 2022, Techno – economic assessment of a synthetic fuel production facility by hydrogenation of CO₂ captured from biogas, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 3307 – 3315.
- Tunçel S, 2017, Büyükbaş Hayvan Gübresi ve Tavuk Gübresinden Biyogaz Üretiminin Adm1 Kullanılarak Modellenmesi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Ulukardeşler A H, Atalay F S, 2018, Kinetic Studies of Biogas Generation Using Chicken Manure as Feedstock, *Journal of Polytechnic*, 21, 913 – 917.
- Ulusoy Y, Ulukardesler A H, Arslan R, Tekin Y, 2017, Energy and Emission Benefits of Chicken Manure Biogas Production – A case Study, 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 5 – 8 Kasım, San Diego, CA, USA.
- Uysal C, Kurt H, Kwak H H, 2017, Exergetic and thermoeconomic analyses of a coal – fired power plant, *International Journal of Thermal Sciences*, 117, 106 – 120.
- Yağlı H, Koç Y, Koç A, Görgülü A, Tandiroğlu A, 2016, Parametric optimization and exergetic analysis comparison of subcritical and supercritical organic Rankine cycle (ORC) for biogas fuelled combined heat and power (CHP) engine exhaust gas waste heat, *Energy*, 111, 923 – 932.
- Yılmaz A, 2019, Türkiye’de Biyogaz Üretimi ve Kurulu Santrallerin Ürettiği Elektrik Enerjisi, *Ecological Life Sciences*, 14, 12 – 18, <http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2019.14.1.5A0112>.
- Yılmaz C, 2015, Thermoeconomic Design and Optimization of Geothermal Energy Use in Hydrogen Production and Liquefaction, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Gaziantep.

- Yin D M, Qiao W, Negri C, Adani F, Fan R, Dong R J, 2019, Enhancing hyper – thermophilic hydrolysis pre – treatment of chicken manure for biogas production by in – situ gas phase ammonia stripping, *Bioresource Technology*, 287, 121470.
- Yinanç S, 2017, Organik Rankine Çevrimi Kullanılarak Biyogaz Tesisi Atık Isısından Elektrik Enerjisi Elde Edilmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
- Wang Z, Gong Z, Turap Y, Wang Y, Zhang Z, Wang W, 2022, Renewable hydrogen production from biogas using iron – based chemical looping technology, *Chemical Engineering Journal*, 429, 132192.
- Wegener M, Isalgue A, Malmquist A, Martin A, Santarelli M, Arranz P, Camarra O, 2021, Exergetic model of a small – scale, biomass – based CCHP/HP system for historic building structures, *Energy Conversion and Management: X*, 12, 100148.
- Wei D, Ji J, Fang J, Yousefi N, 2021, Evaluation and optimization of PEM Fuel Cell – based CCHP system based on Modified Mayfly Optimization Algorithm, *Energy Reports*, 7, 7663 – 7674.
- Zahedi R, Ahmadi A, Dashti R, 2021, Energy, exergy, exergoeconomic and exergoenvironmental analysis and optimization of quadruple combined solar, biogas, SRC and ORC cycles with methane system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111420.
- Zhao S, Chen W, Liu M, Lv H, Liu Y, Niu Q, 2022, Biogas production, DOM performance and microbial community changes in anaerobic co – digestion of chicken manure with *Enteromorpha* and green waste, *Biomass and Bioenergy*, 158, 106359.

11.1 İnternet Kaynakları

- 1- <https://fchartsoftware.com/ees/index.php/>, 28.03.2022
- 2- <https://www.behance.net/gallery/31474615/Afyon-Enerji-ve-Guebre>, 26.03.2022
- 3- <https://ankayalitim.com/hizmetler/afyon-biogaz/>, 26.03.2022
- 4- <https://afyonenerji.com.tr/>, 26.03.2022

5-

<http://www.kimyaevi.org/TR/Genel/BelgeGoster.aspx?F6E10F8892433CFF8007620E7D5602E8DCB77ADD0FAA48D5>, 26.03.2022

6- <https://tr.warbletoncouncil.org/punto-triple-10745>, 26.03.2022

7- http://www.coolprop.org/fluid_properties/fluids/R245fa.html, 26.03.2022

8- <https://encyclopedia.airliquide.com/isopentane>, 26.03.2022

9- <https://encyclopedia.airliquide.com/pentane>, 26.03.2022

10- <https://encyclopedia.airliquide.com/toluene>, 26.03.2022



Yayınları (devam)

: Aksoy F, Solmaz H, Arslan M, Yılmaz E, İpci D, Calam A, 2021, Effects of the regenerator on engine performance of a rhombic drive beta type stirling engine, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 1 – 9, <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1912853>.

Arslan M, Yılmaz C, 2022, Thermodynamic Optimization and Thermoeconomic Evaluation of Afyon Biogas Plant assisted by organic Rankine Cycle for waste heat recovery, 248, 123487.

Arslan M, Yılmaz C, 2022, Afyon Biyogaz Santrali Atık Isı Geri Kazanımı İçin Organik Rankine Çevrimi Entegrasyonunun Termodinamik Analizi ve Optimizasyonu, Gazi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, basım aşamasında.

Arslan M, Yılmaz C, 2022, Design and Optimization of Multigeneration Biogas Power Plant Using Waste Heat Recovery System: A Case Study with Energy, Exergy, and Thermoeconomic Approach of Power, Cooling and Heating, Journal of Fuel, Accepted.