



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI

**BİLECİK GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİNİN ÇOK AMAÇLI SİSTEMLERDE
KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

DAMLA KILIÇ ERİKGENOĞLU

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. OĞUZ ARSLAN

BİLECİK, 2026

10524694

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI

**BİLECİK GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİNİN ÇOK AMAÇLI SİSTEMLERDE
KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

DAMLA KILIÇ ERİKGENOĞLU

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. OĞUZ ARSLAN

BİLECİK, 2026

10524694

BEYAN

Bilecik Güneş Enerjisi Potansiyelinin Çok Amaçlı Sistemlerde Kullanımının Araştırılması başlıklı doktora tezinin hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, [Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine](#) uygun olarak tezimi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Damla KILIÇ ERİKGENOĞLU

../../2026

İmza:

ÖN SÖZ

Doktora eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen, akademik bakış açısı ve yapıcı eleştirileriyle her aşamada yol gösteren değerli danışmanım Prof.Dr. Oğuz ARSLAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde karşılaştığım tüm zorluklarda sonsuz desteğiyle yanımda olan, sevgisiyle güç ve motivasyon sağlayan sevgili eşime ve hayatıma anlam katan canım oğluma teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her koşulda yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Damla KILIÇ ERİKGENOĞLU

2026

ÖZET

Günümüzde artan enerji talebi, sanayileşme, kentleşme ve teknolojik gelişmeler sonucunda hızla yükselmekte ve bu durum sürdürülebilir, verimli ve çevre dostu enerji üretim teknolojilerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Fosil yakıtlara dayalı mevcut enerji sistemleri halen küresel tüketimin büyük bölümünü karşılamakla birlikte, kaynakların sınırlı oluşu ve sera gazı emisyonlarının neden olduğu iklim değişikliği etkileri, alternatif ve yenilenebilir çözümlerin önemini her geçen gün artırmaktadır. Rüzgar, jeotermal, biyokütle ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları bu bağlamda öne çıkarken, güneş enerjisinin temiz, bol ve erişilebilir yapısı ile biyokütlenin karbon nötr niteliği ve atık yönetimiyle entegre edilebilmesi onu çok amaçlı enerji sistemleri açısından cazip hale getirmektedir.

Bu tez çalışmasında, nispeten düşük güneş radyasyonuna sahip Bilecik ilinin yenilenebilir enerji potansiyeli değerlendirilmiş ve bu potansiyelin bir multijenerasyon sistemi kapsamında kullanılması araştırılmıştır. Güneş enerjisi ve biyogaz kaynaklarını bütünleşik bir yapıda kullanan sistem; elektrik, ısı, hidrojen ve oksijen üretimini eş zamanlı sağlayan yedi ana bileşenden (güneş alanı, termal enerji depolama, Brayton çevrimi, alt ısı depolama, SOEC, güç bloğu ve biyogaz üretim ünitesi) oluşmaktadır. Termodinamik analizler, multijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji verimlerinin sırasıyla %35,86 ve %33,70 olduğunu göstermiştir. Ekonomik analiz sonuçlarına göre sistem 9. yıldan sonra karlı hale gelmekte ve 20 yıllık çalışma süresi sonunda 2,308 milyon US\$ kazanç sağlamaktadır.

Bu çalışma, güneş ve biyogaz kaynaklarını bütünleşik olarak kullanan bir multijenerasyon sistemine yüksek sıcaklıklı SOEC ünitesinin entegre edilmesiyle literatürde sınırlı biçimde ele alınan özgün bir yaklaşım sunmaktadır. Özellikle düşük güneş radyasyonuna sahip bir bölge olan Bilecik için sistem performansının ayrıntılı enerji, ekserji ve ekonomik analizlerle değerlendirilmesi, bu tür teknolojilerin farklı iklim koşullarında uygulanabilirliğine yönelik önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Çalışmanın en önemli katkılarından biri, biyogazdan elde edilen ısı enerjisinin yalnızca güç üretiminde değil, aynı zamanda SOEC için gerekli yüksek sıcaklığın sağlanmasında kullanılması ve bunun yanında elektroliz sonucu üretilen oksijenin yanma odasına geri beslenerek alev sıcaklığının artırılmasıyla çevrim veriminin iyileştirilmesidir.

Anahtar kelimeler: Güneş enerjisi, Biyogaz, Hidrojen, Atık ısı, Multijenerasyon sistemi

ABSTRACT

Today, increasing energy demand is rising rapidly as a result of industrialization, urbanization, and technological developments, and this situation increases the need for sustainable, efficient, and environmentally friendly energy production technologies. While current fossil fuel-based energy systems still account for a large portion of global consumption, the limited nature of these resources and the climate change impacts caused by greenhouse gas emissions are increasing the importance of alternative and renewable solutions every day. Renewable energy sources such as wind, geothermal, biomass, and solar stand out in this context. The clean, abundant, and accessible nature of solar energy, combined with biomass's carbon-neutral quality and its potential for integration with waste management, makes it attractive for multi-purpose energy systems.

In this thesis study, the renewable energy potential of Bilecik province, which has relatively low solar radiation, was evaluated, and the use of this potential within a multigeneration system was investigated. The system, which uses solar energy and biogas resources in an integrated structure, consists of seven main components (solar field, thermal energy storage, Brayton cycle, secondary heat storage, SOEC, power block, and biogas production unit) that simultaneously provide electricity, heat, hydrogen, and oxygen production. Thermodynamic analyses show that the energy and exergy efficiencies of the multigeneration system are 35.86% and 33.70%, respectively. According to the economic analysis results, the system becomes profitable after the 9th year and generates a profit of 5.71 million US\$ at the end of its 20-year lifetime.

This study presents a novel approach, which has been addressed only to a limited extent in the literature, by integrating a high-temperature SOEC unit into a multigeneration system that uses solar and biogas sources in an integrated manner. The detailed energy, exergy, and economic analysis of the system performance, particularly for Bilecik, a region with low solar radiation, fills an important gap regarding the applicability of such technologies under different climatic conditions. One of the most important contributions of the study is the use of thermal energy obtained from biogas not only for power generation but also for providing the high temperature required for SOEC, and, in addition, improving cycle efficiency by feeding the oxygen produced by electrolysis back into the combustion chamber to increase flame temperature.

Keywords: Solar energy, Biogas, Hydrogen, Waste heat, Multigeneration system

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLULAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. SİSTEM TASARIMI.....	9
2.1. Güneş Enerjisi Destekli İki Kademeli Güç Çevrimi.....	9
2.2. Biyogaz Destekli Kojenerasyon Çevrimi.....	11
2.3. Biyogaz Destekli Hidrojen Üretimi.....	13
2.3.1. PEM Tabanlı Hidrojen Üretimi.....	13
2.3.2. SOEC Tabanlı Hidrojen Üretimi.....	14
2.4. Güneş Enerjisi ve Biyogaz Destekli Multijenerasyon Çevrimi.....	15
3. MATERYAL VE METOD.....	17
3.1. Güneş Alanı.....	17
3.2. Termal Enerji Depolama Sistemi.....	21
3.3. Isı Değiştiriciler.....	24
3.3.1. Gövde Borulu Isı Değiştiriciler.....	25
3.3.2. Plakalı Isı Değiştiriciler.....	27
3.4. Biyogaz Üretimi ve Reaktör Tasarımı.....	28
3.5. Brayton Çevrimi.....	31
3.6. PEM Ünitesi.....	32

3.7. SOEC Ünitesi	34
3.8. Isı Yükünün Belirlenmesi	38
3.9. Termodinamik Analiz	40
3.10. Ekonomik Analiz	44
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	47
4.1. Güneş Enerjisi Destekli İki Kademeli Güç Çevrimi	47
4.2. Biyogaz Destekli Kojenerasyon Çevrimi.....	58
4.3. Biyogaz Destekli Multijenerasyon Çevriminin PEM elektrolizörü ile Entegrasyonu	66
4.4. Biyogaz Destekli Multijenerasyon Çevriminin SOEC Elektrolizörü ile Entegrasyonu	74
4.5. Güneş Enerjisi ve Biyogaz Destekli Multijenerasyon Çevrimi	80
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	98
KAYNAKÇA	100

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Sistem tasarımında kullanılan akışkanların termodinamik özellikleri	11
Tablo 3.1. PTSC'lerin teknik özellikleri	17
Tablo 3.2. TED tanklarının teknik özellikleri.....	21
Tablo 3.3. Termal enerji depolama tanklarının yapısal özellikleri.....	22
Tablo 3.4. Isı değiştiricilerin teknik özellikleri	25
Tablo 3.5. <i>CTP</i> ve <i>CL</i> değerleri	26
Tablo 3.6. Bilecik'in atık miktarı ve özellikleri	28
Tablo 3.7. Biyogaz hesabında kabul edilen değerler.....	29
Tablo 3.8. PEM'in özellikleri	34
Tablo 3.9. SOEC ünitesinin teknik özellikleri.....	38
Tablo 3.10. Bina yapılarının ısı transfer katsayısı ve ısı transfer alanı	39
Tablo 3.11. Tüm sistem bileşenlerinin enerji ve ekserji denge denklemleri	42
Tablo 3.12. Ekipman maliyeti için sabit değerler.....	45
Tablo 4.1. R152a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli güç çevrimi için güneşlenme zamanında her bir noktanın termodinamik özellikleri.....	51
Tablo 4.2. R152a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli güç çevrimi için güneş olmadığı zamanda her bir noktanın termodinamik özellikleri	51
Tablo 4.3. R152a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli güç çevriminde sistemin herbir bileşeninin enerji ve ekserji analizi sonuçları	52
Tablo 4.4. R152a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli güç çevriminin NBD analizi sonuçları	53
Tablo 4.5. R600a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli güç çevrimi için güneşlenme zamanında her bir noktanın termodinamik özellikleri	56
Tablo 4.6. R600a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli güç çevrimi için güneş olmadığı zamanda her bir noktanın termodinamik özellikleri	56

Tablo 4. 7. R600a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli güç çevriminde sistemin her bir bileşenin enerji ve ekserji analizi sonuçları	57
Tablo 4.8. R600a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli güç çevriminin NBD analizi sonuçları	58
Tablo 4.9. Biyogaz destekli kojenerasyon çevriminin her bir noktasına ait termodinamik özellikler.....	65
Tablo 4.10. Biyogaz destekli kojenerasyon çevrimindeki bileşenlerin enerji ve ekserji analizi sonuçları	65
Tablo 4.11. Biyogaz destekli PEM elektrolizörü entegre edilen sistemin parametre değerleri ve tasarım numaraları.....	66
Tablo 4.12. Biyogaz destekli, PEM elektrolizörü entegre edilen sistemde her noktanın termodinamik özellikleri	72
Tablo 4.13. Biyogaz destekli, PEM elektrolizörü entegre edilen sistemde her bileşenin enerji ve ekserji analizi sonuçları	72
Tablo 4.14. Biyogaz destekli, PEM elektrolizörü entegre edilen sistemin NBD analizi sonuçları	73
Tablo 4.15. Biyogaz destekli SOEC elektrolizörü entegre edilen sistemin parametre değerleri ve tasarım numaraları	74
Tablo 4.16. Biyogaz destekli, SOEC elektrolizörü entegre edilen sistemde her noktanın termodinamik özellikleri	79
Tablo 4.17. Biyogaz destekli, SOEC elektrolizörü entegre edilen sistemde her bileşenin enerji ve ekserji analizi sonuçları	79
Tablo 4.18. Biyogaz destekli, SOEC elektrolizörü entegre edilen sistemin NBD analizi sonuçları	80
Tablo 4.19. Multijenerasyon sisteminin her bir noktasındaki termodinamik özellikler.....	93
Tablo 4.20. Multijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji analizi sonuçları	94
Tablo 4.21. Multijenerasyon sisteminin NBD analiz sonuçları.....	96

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Güneş enerjisi destekli iki kademeli güç çevrimi akış diyagramı	10
Şekil 2.2. Biyogaz destekli kojenerasyon sistemi	12
Şekil 2.3. PEM tabanlı multijenerasyon sistemi	13
Şekil 2.4. SOEC tabanlı multijenerasyon sistemi	14
Şekil 2.5. Güneş Enerjisi ve Biyogaz Destekli Multijenerasyon Çevrimi	15
Şekil 3.1. Günlük toplam güneş radyasyon, direkt radyasyon, difüz radyasyon ve K_T değerleri	19
Şekil 3.2. 1 Temmuz gününe ait saatlik DNI ve çevre sıcaklığı değerleri.....	20
Şekil 3.3. TED tankı modeli.....	22
Şekil 3.4. Reaktör tankı kesiti ve malzeme özellikleri.....	30
Şekil 3.5. Brayton çevrimi akış diyagramı.....	31
Şekil 3.6. Günlük çevre sıcaklığı ve konuların ısı ihtiyacının değişimi	39
Şekil 4.1. R152a soğutucu akışkanın kullanıldığı sistemin η ve ε değişimi.....	48
Şekil 4.2. R152a soğutucu akışkanın kullanıldığı sistemin W_{net} ve NBD değişimi	50
Şekil 4.3. R600a soğutucu akışkanın kullanıldığı sistemin η ve ε değişimi	54
Şekil 4.4. R600a soğutucu akışkanın kullanıldığı sistemin W_{net} ve NBD değişimi	55
Şekil 4.5. %100 CH ₄ yanması durumunda η ve ε değişimi	59
Şekil 4.6. %80 CH ₄ yanması durumunda η ve ε değişimi	60
Şekil 4.7. %60 CH ₄ yanması durumunda η ve ε değişimi	60
Şekil 4.8. (a) %100 CH ₄ için, (b) %80 CH ₄ için, (c) %60 CH ₄ için, CR'nin yanma sonu ürün sıcaklığına etkisi.....	61
Şekil 4.9. %100 CH ₄ yanması durumunda W_{net} ve Q_s değişimi.....	62
Şekil 4.10. %80 CH ₄ yanması durumunda W_{net} ve Q_s değişimi.....	63
Şekil 4.11. %60 CH ₄ yanması durumunda W_{net} ve Q_s değişimi.....	63
Şekil 4.12. Farklı metan gazı oranlarına göre atık ısıdan yararlanılan konut sayıları	64

Şekil 4.13. PEM elektrolizöründe H ₂ ve O ₂ üretim miktarı.....	67
Şekil 4.14. PEM entegre edilen sistemde $W_{net,e}$ ve T_4 'ün farklı tasarım parametrelerine göre değerlendirilmesi.....	68
Şekil 4.15. PEM entegre edilen sistemde elektrik üretimi ve depolanan ısının değerlendirilmesi	69
Şekil 4.16. Biyogaz destekli, PEM entegre edilen sistemin enerji ve ekserji verimlerinin değişimi	70
Şekil 4.17. Biyogaz destekli, PEM entegre edilen sistemin maliyet analizi değerlendirmesi .	71
Şekil 4.18. SOEC elektrolizöründe H ₂ ve O ₂ üretim miktarı	75
Şekil 4.19. SOEC entegre edilen sistemin $W_{net,e}$ ve T_4 'ün farklı tasarım parametrelerine göre değerlendirilmesi.....	76
Şekil 4.20. SOEC entegre edilen sistemin elektrik üretimi ve depolanan ısının değerlendirilmesi	77
Şekil 4.21. Biyogaz destekli, SOEC entegre edilen sistemin enerji ve ekserji verimlerinin değişimi	77
Şekil 4.22. Biyogaz destekli, SOEC entegre edilen sistemin maliyet analizi değerlendirmesi	78
Şekil 4.23. Güneş enerjisi destekli iki kademeli güç çevriminin enerji ve ekserji verimi	81
Şekil 4.24. Güneş enerjisi destekli iki kademeli güç çevriminin net güç üretimi ve ilk yatırım maliyeti.....	82
Şekil 4.25. Durum I için NBD'nin güç kullanım oranına göre değişimi	83
Şekil 4.26. Durum II için NBD'nin güç kullanım oranının göre değişimi	84
Şekil 4.27. Durum I şartlarında akım yoğunluğu ve T_{SOEC} sıcaklığına göre hidrojen ve oksijen üretimi	84
Şekil 4.28. Durum II şartlarında akım yoğunluğu ve T_{SOEC} sıcaklığına göre hidrojen ve oksijen üretimi	85
Şekil 4.29. CR ve T_{SOEC} 'in farklı parametrelerine göre W_{net} , brayton'nın değişimi.....	86
Şekil 4.30. Havadaki nemin yanma sonu sıcaklığına etkisi.....	87
Şekil 4.31. Oksijenle zenginleştirilen havanın $T_{ürün}$ üzerindeki etkisi.....	88

Şekil 4.32. Durum I şartlarında multijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji verimi değerlendirmesi	89
Şekil 4.33. Durum II şartlarında multijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji verimi değerlendirmesi	89
Şekil 4.34. Durum I şartlarında akım yoğunluğu ve neme bağlı olarak multijenerasyon sisteminin NBD analizi	90
Şekil 4.35. Durum II şartlarında kim yoğunluğu ve neme bağlı olarak multijenerasyon sisteminin NBD analizi	91
Şekil 4.36. Atık ısının mevsimsel kullanım açısından değerlendirilmesi	92

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

<i>A</i>	: Alan (m^2)
AC	: Hava kompresörü
<i>b</i>	: Plakalar arası mesafe (m)
<i>B_t</i>	: Nakit akışı
<i>C</i>	: Maliyet (US\$)
CC	: Yanma odası
CEPCI	: Kimya mühendisliği tesis maliyet indeksi
<i>c_p</i>	: Özgül ısı (kJ/kgK)
CR	: Sıkıştırma oranı
CST	: Soğuk depolama tankı
<i>D</i>	: Çap (m)
DHW	: Sıcak su
DNI	: Direkt normal radyasyon (W/m^2)
<i>e</i>	: Bölme aralığı (m)
<i>E</i>	: Aktivasyon enerjisi (kJ/kmol)
<i>Ė</i>	: Enerji (kW)
<i>Ė_x</i>	: Ekserji (kW)
<i>F</i>	: Faraday sabiti
<i>F_{BM}</i>	: Çıplak modül maliyet faktörü
<i>F_R</i>	: Isı taşıma faktörü
<i>F'</i>	: Kolektör verim faktörü
<i>G</i>	: Gibbs enerjisi (kJ)
GA	: Güneş alanı
GB	: Güç bloğu
GT	: Gaz türbini

<i>H</i>	: Yükseklik (m), Güneş radyasyonu (W/m ²)
<i>H₀</i>	: Extraterrestrial radyasyon (W/m ²)
<i>h</i>	: Entalpi (kJ/kg), Isı taşınım katsayısı (W/m ²)
\bar{h}	: Molar entalpi (kJ/kmole)
HBS	: Hidrolik bekleme süresi
HE	: Isı değiştirici
HST	: Sıcak depolama tankı
<i>J</i>	: Akım yoğunluğu (A/m ²)
<i>K_t</i>	: Bulutluluk göstergesi
<i>k</i>	: Isı iletim katsayısı(W/m°C)
<i>KM</i>	: Kuru madde
<i>L</i>	: Uzunluk (m)
<i>l</i>	: Duvar kalınlığı (m)
<i>m</i>	: Kütle (ton)
\dot{m}	: Kütleli debi (kg/s)
<i>N</i>	: PTSC sayısı
<i>N_p</i>	: Plaka sayısı
\dot{n}	: Mol oranı (kmol/s)
<i>n_{pass}</i>	: Geçiş sayısı
NBD	: Net bugünkü değer
<i>Nu</i>	: Nusselt sayısı
<i>OKM</i>	: Organic kuru madde
ORC	: Organic rankine çevrimi
PTSC	: Parabolik oluklu kolektör
<i>P</i>	: Basınç (kPa), Pompa
PEM	: Proton değilim membranı

PR	: Güç oranı
R	: Isıl direnç
r	: Yarıçap (m), Gözenek çapı (m), İskonto oranı (%)
r_{kr}	: Kritik yarıçap
Re	: Reynold sayısı
R'_f	: Kirlenme fakötrü
RH	: Konut ısıtması
R_u	: Evrensel gaz sabiti (kJ/kmole.K)
s	: Entropi (kj/kgK)
SOEC	: Katı oksit elektroliz hücresi
SRC	: Buharlı rankine çevrimi
T	: Sıcaklık (°C, K)
t	: Plaka kalınlığı (m), Elektrolit kalınlığı (µm)
TED	: Termal enerji depolama
U	: Isı kayıp katsayısı (W/m ² °C)
V	: Hacim (m ³), Voltaj (V)
V_{bio}	: Biogaz üretimi (m ³ /gün)
V_{CH₄}	: Metan gazı miktarı
V_D	: Çürütme tankı hacmi (m ³)
Q̇	: Isı enerjisi (kW)
Ẇ	: Güç (kW)
W	: Genişlik (m)
z	: Reaksiyon başına elektron sayısı
α_{th}	: Stokiyometrik katsayı
y_i	: Mol kesri
δ	: Denklinasyon açısı (°)

ε	: Ekserji verimi (%), Lennard-Jones uzunluğu
η	: Enerji verimi (%)
θ	: Geliş açısı, Tüp yerleşim açısı
θ_z	: Zenit açısı
κ	: Boltzmann sabiti
λ	: Hava fazlalık katsayısı
μ_{bio}	: Biyogaz verimi
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
τ	: Elektriksel iletkenlik ($1/\Omega\text{m}$)
φ	: Enlem açısı, nem (%)
ψ	: Ekserji akısı (kJ/kg)
ω	: Saat açısı
Ω	: Difüzyon çarpışma integrali

1. GİRİŞ

Günümüzde artan enerji talebi, sanayileşme, kentleşme ve teknolojik gelişmelerle birlikte hızla yükselmekte ve bu durum enerji üretiminde sürdürülebilir, verimli ve çevre dostu çözümlere olan ihtiyacı arttırmaktadır. Fosil yakıtlara dayalı geleneksel enerji sistemleri halen küresel talebin büyük bir kısmını karşılada bu kaynakların sınırlı oluşu ve özellikle sera gazı emisyonlarına bağlı iklim değişikliği etkileri, mevcut yapıların uzun vadeli sürdürülebilirliğini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji teknolojilerine yönelik araştırmalar ve yatırımlar son yıllarda hızla artmış; gerekli enerji arz güvenliğini güçlendirmek, çevresel etkileri azaltmak ve iklim değişikliği ile mücadele etmek amacıyla yenilenebilir kaynaklar küresel enerji politikalarının merkezine yerleşmiştir.

Rüzgar, jeotermal, biyokütle ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları, düşük çevresel etkileri ve geniş uygulanabilirlik özellikleri sayesinde fosil yakıtlara güçlü bir alternatif sunmaktadır. Bu kaynaklar içerisinde güneş enerjisi, sınırsız, temiz ve kolay ulaşılabilirliği sayesinde özel bir öneme sahiptir. Özellikle son yıllarda yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, güneşten elde edilen ısının yüksek sıcaklıklara çıkarılarak termodinamik çevrimleri beslemesi mümkün hale gelmiştir. Bu sistemler içinde en yaygın kullanılan teknolojilerden biri olan parabolik oluklu kolektörler (PTSC), güneş ışınlarını odak hattında bulunan bir alıcı tüpe yoğunlaştırarak akışkan sıcaklığını 400 °C'ye kadar çıkarabilmektedir (Boukellia vd., 2016). Bu teknoloji, yüksek termal verimi, geniş ölçekli alanlara kolay uyarlanabilirliği ve termal enerji depolama sistemleriyle entegre çalışabilmesi sayesinde hem güç üretiminde hem de yenilenebilir tabanlı ısıtma uygulamalarında avantaj sunmaktadır (Mosleh ve Ahmadi, 2019). Özellikle termal depolama birimleriyle birlikte kullanıldığında, güneş ışınımının yetersiz olduğu saatlerde bile kesintisiz enerji üretilebilmesi, PTSC tabanlı sistemleri endüstriyel ölçekte son derece cazip hale getirmektedir.

Atık ısının geri kazanımı, enerji sistemlerinin hem performansı hem de sürdürülebilirliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Bundan dolayı son yıllarda güneş enerji santrallerinde geleneksel tek kademeli güç çevrimlerine alternatif olarak sisteme ikinci bir alt çevrim entegre edilmesine yönelik araştırmalar artış göstermiştir.

Bahari vd. (2021), buharlı rankine çevrimi (SRC) ve organik rankine çevriminden (ORC) oluşan PTSC tabanlı kombine güç çevrimi geliştirdiler. Sistem bir termal enerji depolama (TED) ünitesi ile desteklenmiş ve hem ekserji veriminin en üst düzeye çıkarılması hem de seviyelendirilmiş elektrik maliyetinin en aza indirilmesi için parçacık sürü optimizasyonu tabanlı optimizasyon gerçekleştirilmiştir. EES ve MATLAB kullanılarak

yapılan analizler sonusunda, optimum çalışma noktasında ekserji verimi ve elektrik maliyeti sırasıyla %63,89 ve 0,01529 USD/kWh olarak belirlemiştir. Ayrıca toplam ekserji yıkımının %59'dan fazlasının güneş kolektörlerinde gerçekleştiği belirtilmiştir.

Li vd. (2023), çalışmalarında güneş enerjisine dayalı ORC-SRC sisteminin termo-ekonomik analizini gerçekleştirdiler. Önerilen sistemde, ORC'de çalışma akışkanı olarak bifenil ve difenil oksit karışımı kullanılmış; bu akışkan 400 °C sıcaklıklarda türbini çalıştırarak güç üretmekte kalan enerji alt çevrimde buhar üretimi için kullanılmaktadır. Böylece geleneksel tek kademeli güneş enerji santrallerinde %42 seviyelerinde olan enerji verimi bu sistem ile %45,3'e ulaşmıştır. Ayrıca 7,44 MPa gibi düşük buhar basıncı, yüksek basınç türbinlerindeki kaçak kayıplarını azaltmakta ve ekipman maliyetini düşürmektedir.

Khandelwal vd. (2022), farklı ısı transfer akışkanları için kademeli bir TED sistemi ile PTSC'ye dayalı bir kombine güç çevriminin termodinamik analizini gerçekleştirdiler. Çalışmada güneş alanı ile TED sistemi entegrasyonunun kombine çevrim üzerindeki enerji ve ekserji performansına, depolama verimine ve özellikle ekserji yıkımının dağılımına etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak en yüksek ekserji kayıplarının güneş kolektörlerinde olduğu, kademeli TED kullanımının ise bu kayıpları azalttığı ve ekserji verimini iyileştirdiğini göstermişlerdir. Ayrıca erimiş tuz kullanılan TED sisteminin, diğer ısı transfer akışkanlarına kıyasla daha yüksek ekserji performansı ve daha iyi CO₂ azaltım potansiyeli sunduğunu ortaya koymuştur.

Cao vd. (2022), güneş enerjisi kullanımına dayalı süperkritik CO₂ brayton ve ORC kombine çevrimini incelediler. 1400 kWh/m²'nin üzerinde bir güneş radyasyonu değerine sahip bir bölge için geliştirilen sistemde, en uygun çalışma koşullarında sistemin enerji verimini ve net güç üretimini sırasıyla %35,07 ve 16,63 MW olarak belirlediler.

Li vd. (2016), PTSC tabanlı iki kademeli SRC-ORC çevrimlerine sahip sistemi araştırdılar. Sistem 800 W/m²'lik direkt normal radyasyon (DNI) değerine sahip bir bölge için geliştirildi ve termodinamik analiz sonucunda iki kademeli çevrimin ısı verimi %15,62 olarak belirlendi. Parametrik değerlendirme sonucunda yoğuşma sıcaklığı, türbin giriş basıncı ve kolektör çıkış sıcaklığının sistem performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir.

Mirjavadi vd. (2022), güneş enerjisi destekli SRC-ORC ve SRC-Kalina çevrimlerini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Sonuçlar, SRC-Kalina çevriminin, ORC'li sisteme göre daha yüksek verime sahip olduğunu göstermiştir. Özellikle SRC'nin yoğuşma basıncı ile alt

çevrimin türbin çıkış basıncının sistemin toplam verimi üzerinde en etkili parametreler olduğu belirtilmiştir. Buna karşılık seviyelendirilmiş enerji maliyetinin her iki sistem içinde yaklaşık 0,011 \$/kWh düzeyinde ve birbirine çok yakın olduğu belirlenmiş olup Kalina çevriminin termodinamik açıdan üstünlük sağlarken ekonomik açıdan ORC ile benzer maliyet yapısına sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Habibi vd. (2020), çalışmalarında PTSC tabanlı ve TED sistemine sahip SRC-ORC çevrimini enerji ve eksergoekonomik açıdan incelemiş olup, genetik algoritma ile optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Parametrik analiz ile güneş ışıınımı, kolektör alanı, buharlaşma/yoğuşma sıcaklıkları ve türbin giriş basıncının sistem performansına etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak optimum tasarım noktasında 5.540 m² kolektör alanına ve 184,7 m³ depolama hacmine sahip sistemin 782 kW güç üretebileceği, %18,61 ekserji verimine ve 228 \$/h maliyete sahip olduğu belirlenmiştir. Geleneksel sisteme kıyasla iki kademeli çevrimin net güç üretiminde %65, ekserji veriminde %2,9 ve elektrik birim maliyetinde %27,26 iyileşme sağlandığı belirtilmiştir.

Boukelia vd. (2025), çalışmalarında PTSC kullanılan güneş alanı ve ORC'den oluşan üst çevrim ile buhar sıkıştırırmalı soğutma alt çevriminden oluşan bir atık ısı geri kazanım sistemi ve ayrıca elektroliz ünitesi içeren sistemi detaylı olarak analiz etmişlerdir. Tesisin temel amacı atık ısıyı geri kazanarak aynı sistemden elektrik, soğutma ve hidrojen üretmektedir. Nominal çalışma koşullarında sistemin genel verimi %20,86, elektrik üretimi 3,62 MW, soğutma kapasitesi 2,35 MW ve hidrojen üretimi 0,0072 kg/s olarak belirlenmiştir.

Biyokütle tabanlı enerji üretiminde son yıllarda öne çıkan sürdürülebilir enerji stratejilerinin önemli bir bileşeni haline gelmiştir. Hayvansal gübreler, belediye atıkları ve tarımsal artıklar gibi çeşitli biyokütle türlerinden anaerobik fermantasyon yöntemiyle elde edilen biyogaz; metan ve karbondioksitin yanı sıra eser miktarda hidrojen sülfür, azot oksitler, oksijen ve su buharı içermektedir (Seirafi vd., 2024). Bu gazların uygun teknoloji ile enerjiye dönüştürülmesi, hem çevre kirliliğinin azaltılmasına katkı sağlamakta hem de organik atıkların kontrolsüz ayrışması sonucu oluşabilecek zararlı emisyonları engelleyerek etkili bir atık yönetimi sunmaktadır (Kour vd., 2024). Biyogaz teknolojisi, atık yönetimini enerji üretimi ile entegre eden yapısı sayesinde çevresel sürdürülebilirliği artırmakta; sera gazı emisyonlarının azaltılması, karbon nötr enerji üretimi ve yerel enerji güvenliğinin sağlanması gibi çok yönlü faydalar oluşturmaktadır.

Trinca vd. (2023), çalışmalarında biyokütle kaynağı olarak kahve atığı ve plastik kullanılan sistemin termodinamik ve çevresel analizini gerçekleştirdiler. Buna göre %60'ın

üzerinde enerji ve ekserji verimi elde edilmiş ve düşük CO₂ emisyonuyla çevre dostu hidrojen üretimi sağlanmıştır. Buna göre çalışma, atıkların enerjiye ve hidrojen gibi değerli ürünlere dönüştürülmesinde sürdürülebilir bir yaklaşım sunmaktadır.

Farajollahi vd. (2025), çalışmalarında belediye atıklarına dayalı bir güç santrali tasarlamışlardır. Optimum çalışma koşullarında 380 ton/gün belediye atığından 32.174 m³/gün biyogaz elde edilmiştir. Kojenerasyon sisteminde günlük 2,9 MW elektrik ve 3,3 MW ısı üretilirken, yan ürün olarak 48 ton/gün biyogübre elde edilmiştir. Üretilen elektriğin, belirlenen şehrin toplam elektrik talebinin %3'ünü karşılayabilecek düzeyde olduğu belirlenmiştir. Ekonomik analiz sonucunda, 20 yıllık işletme süresi içinde 6,33 milyon € net bugünkü değer (NBD) belirlenmiş olup sistemin ekonomik olarak uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Ayrıca tesis, yılda 85.023 ton CO₂ tasarrufu sağlayarak çevresel açıdan sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır.

Arslan ve Yılmaz (2023), biyogaz tabanlı bir kojenerasyon sistemine ORC entegre ederek atık ısıdan faydalanılması amaçlanmıştır. ORC'de elde edilen güç, elektroliz yoluyla hidrojen üretiminde, biyogazdaki kükürt gideriminde kullanılmıştır. Sistem termodinamik ve termoeconomik açıdan analiz edilmiştir. Sonuç olarak tesisin enerji ve ekserji verimleri %41,55 ve %36,42 olarak belirlenmiştir. Ayrıca sistemin güç kapasitesi 5.792 kW, hidrojen üretim miktarı ise 0,012415 kg/s olarak hesaplanmıştır.

Bai vd. (2023), jeotermal ve biyokütle kaynaklarının hibrit kullanımıyla çalışan bir elektrik-içme suyu kojenerasyon sistemi geliştirilmiş ve kapsamlı bir termodinamik, ekserji, çevresel ve ekonomik değerlendirme yapılmıştır. Çok amaçlı optimizasyonla sistemin en iyi çalışma koşulları belirlenmiş ve hibrit sistemin hem elektrik hem de içme suyu üretimi için uygulanabilir olduğu belirtilmiştir. Optimum koşullarda sistemin ekserji verimi %44,12, birim ürün maliyeti 66,97 \$/MWh, ekserji-çevresel indeksi 0,5114 ve CO₂ emisyon faktörü 0,7105 kg/kWh olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar sistemin çevresel ve ekonomik olarak umut verici bir seçenek olduğunu ortaya koymuştur.

Zare vd. (2019), çalışmalarında 30 MW kapasiteli bir gaz türbini, anaerobik reaktör, buhar jeneratörü ve ön arıtma hattını ısıtmak için kullanılan ısı eşanjöründen oluşan bir kojenerasyon çevrimi değerlendirilmiştir. Tasarım değişkenleri olarak kompresör basınç oranı, türbin ve kompresör izantropik verimleri, biyogaz-doğalgaz karışım oranı, hava ısıtıcı çıkış sıcaklığı, türbin giriş sıcaklığı ve evaporatör pinch noktası sıcaklık farkı seçilmiştir. Genetik algoritma tabanlı çok amaçlı optimizasyon ile toplam maliyet oranı ve ekserji verimi iki farklı senaryo altında incelenmiştir. Birinci senaryoda yakıt karışım oranı serbest değişken olarak

değerlendirilmiş ve optimizasyon sonucunda ekserji verimi %46,59'dan %53,25'e yükselmiş, toplam maliyet oranı ise 4.385 \$/h'den 2.935 \$/h'ye düşmüştür. İkinci senaryoda yakıt karışım oranı %50'de sabitlenmiş; bu durumda optimum tasarımın ekserji veriminin %48,35'ten %50,5'e, toplam maliyet oranının ise 4.028 \$/h'den 3.665 \$/h'ye iyileştiği görülmüştür. Bu bulgular, biyogaz–doğalgaz karışımının ve çevrim parametrelerinin optimizasyonunun termodinamik ve ekonomik performansını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

Abdolalipouradl vd. (2025), biyogazla çalışan gaz türbini tabanlı multijenerasyon sistemi önermişlerdir. Önerilen sistem aynı anda elektrik, hidrojen, tatlı su ve ısıtma olmak üzere dört farklı çıktı üretmektedir. Termodinamik ve eksergoekonomik analizler sonucunda sistemin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %62,45 ve %32,52 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar önerilen sistemin geleneksel biyogaz yakıtlı gaz türbini sistemlerine kıyasla daha yüksek verimlilik sağladığını göstermiştir.

Asadabadi vd. (2025), SOEC, kademeli ORC ve claude çevrimi ile entegre edilmiş biyokütle ile çalışan gaz türbini sistemi için çeşitli biyokütle yakıtlarının karşılaştırmalı bir değerlendirmesini sunmuşlardır. Makine öğrenmesi tabanlı optimizasyon yaklaşımının kullanıldığı çalışmada, kümes kayvanı gübresinin en uygun biyokütle yakıtı olduğu belirlenmiştir. Buna göre sistemin ekserji verimliliği, toplam maliyet oranı ve CO₂ emisyonu sırasıyla %39,8, 82,1\$/h ve 0,60 kg/kWh olarak belirlenmiştir.

Yan vd. (2025), çalışmalarında jeotermal ve biyokütle kaynaklarına sahip çok üretimli bir sistem önerdiler. Sistemin 0,223 kg/s metanol ve 0,020 kg/s hidrojen üretim hızlarıyla toplam 9.926,13 kW güç üretebileceği belirlenmiştir. Ayrıca, sistemin enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla %36,75 ve %31,89 olarak hesaplanmıştır. Son olarak sistemin 2,56 yıllık geri ödeme süresiyle ekonomik ve çevresel açıdan uygulanabilir olduğu belirtilmiştir.

Bamisile vd. (2025), çalışmalarında güç, soğutma, sıcak su ve hidrojen üretebilen biyokütle entegreli multijenerasyon sistemi termodinamik açıdan değerlendirilmiştir. Sistem buhar çevrimi, absorpsiyon soğutma ünitesi, sıcak su tankı ve Proton Değişim Membranı (PEM) elektrolizöründen oluşmaktadır. Çalışmanın temel amacı pirinç kabuğu ve şeker kamışı bagasından elde edilen biyogazın termodinamik performans üzerindeki etkilerini karşılaştırarak en uygun biyokütle girdisini belirlemektedir. Sonuç olarak pirinç kabuğu biyogazı ile çalışan sistemin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %34,83 ve %12 olarak bulunmuştur. Şeker kamışı bağı biyogazıyla çalışan sistemde ise bu değerlerin %68,29 ve %21,85'e yükseldiği belirlenmiştir.

Zare vd. (2025), çalışmalarında biyogazla çalışan gaz türbini tabanlı bir güç santrali önermişlerdir. Sistemde soğutma işlemi, gaz türbininden geri kazanılan atık ısıyla çalışan güç-ejektörlü soğutma ünitesi aracılığıyla sağlanmaktadır. Sistem enerji, ekserji ve ekonomik açıdan değerlendirilmiş ve çok kriterli karar verme yöntemiyle optimize edilmiştir. Sonuç olarak, optimum koşullarda soğutmalı sistemin ekserji verimi %39,38'dir. Bu sonuç soğutmasız sisteme ait %33,64 olan ekserji veriminin belirgin şekilde üzerindedir. Ayrıca soğutmalı sistemin daha yüksek ilk yatırım maliyeti gerektirse de daha düşük birim ürün maliyeti sunduğu ve bundan dolayı ekonomik açıdan da avantajlı olduğu belirtilmiştir.

Enerji verimliliğinin artırılması ve yenilenebilir kaynakların etkin kullanımı için geliştirilmiş teknolojilerin enerji üretim sistemlerine entegre edilmesi, sürdürülebilir enerji dönüşümünün kritik bir parçası olarak görülmektedir. Güneş enerjisi ile biyogazın birlikte değerlendirilmesi, hem fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmakta hem de çok kaynaklı hibrit sistemler sayesinde enerji üretiminin sürekliliğini ve verimliliğini artırmaktadır. Bu tür hibrid sistemler, atık ısı geri kazanımının da eklenmesiyle birlikte enerji üretiminde yenilikçi ve yüksek verimli çözümler sunarak modern enerji altyapılarının önemli bir parçası hâline gelmektedir.

Güneş enerjisi ve biyogazın birlikte kullanımı, her iki kaynağın dezavantajlarını dengeleyerek daha güvenilir ve sürdürülebilir bir enerji üretim altyapısı oluşturur. Güneş enerjisinin günlük ve mevsimsel koşullara bağlı olarak değişken yapısı, biyogazın sürekli üretim kapasitesiyle desteklenebilir. Öte yandan, biyogazın sınırlı üretim potansiyeli ve yakıt işleme gereksinimleri, güneş enerjisi bazlı ısı ve elektrik üretimiyle tamamlanabilir. Böylece hibrit sistem sürekli güç üretimi sağlarken aynı zamanda atık yönetimi, sera gazı azaltımı ve hidrojen ve oksijen üretimi gibi katma değerli ürünlerin üretimi yoluyla çok yönlü bir enerji çözümü sunabilir. Güneş enerjisi ve biyogazın entegrasyonu, enerji talebinin karşılanması, ekonomik uygulanabilirlik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Güneş enerjisi ve biyogazın multijenerasyon sistemlerinde kullanımıyla ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır.

Li vd. (2025), biyokütle, güneş enerjisi ve hidrojen üretim teknolojilerini entegre eden çok üretimli bir sistem geliştirdiler. Sistemin genel enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla %45,52 ve %66,85'tir. Önerilen sistem, hem çevresel uyumluluğu hem de ekonomik sürdürülebilirliği sağlarken, gelecekteki enerji üretimi için umut verici bir potansiyel göstermektedir.

Bahadar vd. (2025), biyokütle kaynağı olarak hindistan cevizi kabuğu kullanılan bir multijenerasyon sistemi geliştirmişlerdir. Sonuç olarak sistemin 492,5 kW güç, 4,4 kg/h

hidrojen ve 191 kg/h tatlı su üretme potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir. Tasarlanan sistemin enerji ve ekserji verimi sırasıyla %86,3 ve %62,5 olarak bulunmuştur. CO₂ azaltımında önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilen sistemin farklı iklim koşulları altında uygulanabilirliği değerlendirilmiştir.

Sabbaghi vd. (2024), çalışmalarında madofiy gaz türbini çevrimi, trasnkritik CO₂ (TCO₂) çevrimi, SRC, biyokütle kazanı ve güneş kolektörlerinden oluşan beşli hibrit multijenerasyon sistemi geliştirmişlerdir. Gaz türbinlerinde görülen düşük termal verim nedeniyle, sistem performansını arttırmak amacıyla TCO₂ ve SRC birleşik şekilde entegre edilmiştir. Ayrıca sistemde PEM elektrolizörü ile hidrojen üretimi ve PEM yakıt hücresi ile ek elektrik üretimi sağlanmıştır. Termodinamik analiz sonucunda sistemin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %20,2 ve %15,2 olarak belirlenmiştir. Toplam ekipman yatırım maliyeti 0,007554 \$/s, çevresel etki değeri ise 0,0008611 pt/s olarak belirlenmiştir.

Bai vd. (2024), çalışmalarında elektrik, ısı hidrojen ve tatlı su üreten bir multijenerasyon sistemini termodinamik, ekonomik ve çevresel açıdan incelemiştir. Sonuç olarak sisteminden 14,86 MW güç üretimi, 40,22 kg/s tatlı su debisi ve %19,81 ekserji verimi elde edilmiştir. Ekserji analizinde 81,48 MW ekserji yıkımı belirlenmiştir, bunu %85,8'inin PTSC kolektörlerinde meydana geldiği belirtilmiştir. Ekonomik değerlendirme sonucunda sistemin geri ödeme süresi 4 yıl olarak belirlenmiştir.

Sharifishourabi vd. (2025), çalışmalarında ısı, güç, sıcak su, soğutma ve hidrojen üretimi sağlayan güneş ve biyokütle entegreli multijenerasyon sistemini kapsamlı biçimde değerlendirmişlerdir. Sistem biyogaz üretimi ve gübre eldesi sağlayan anaerobik reaktör, güneş kolektörleri, brayton çevrimi, SRC, ORC ve absrobsiyonlu soğutma ünitesinden oluşmaktadır. Analiz sonucunda tesisin net güç üretimi 5.507 kW, hidrojen üretim oranı 2,2 kg/h olarak belirlenmiştir. Ayrıca sistemin genel enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %58,43 ve %56,92'dir. Ekonomik değerlendirme sonucunda sistemin 2031 sonrası kara geçtiği ve 2044 yılında yaklaşık 95,61 milyon \$ NBD değerine ulaşabileceği belirtilmiştir.

Rabeti vd. (2026), çalışmalarında Kanarya adaları için güç ve tatlı su üretimini birlikte sağlayan biyokütle ve güneş enerji temelli bir sistemi incelemiştir. Çalışmalarında biyokütle kaynağı olarak bölgeye özgü kanarya çamı iğnesi kullanılmıştır. Termodinamik ve ekonomik açıdan analiz edilen sistemin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %31,64 ve %14,35 olarak belirlenmiştir. Elektrik için seviyelendirilmiş maliyet 0,19 \$/kWh, çevresel etki 1,25 mPts/kWh, geri ödeme süresi ise 3,22 yıl olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, biyokütle-

güneş hibrit sistemlerinin ada bölgelerinde sürdürülebilir enerji ve su üretimi için güçlü bir seçenek olduğunu göstermektedir.

Türk ve Dinçer (2025), çalışmalarında güneş ve biyokütle enerjisi ile entegre edilen bir multijenerasyon sistemini termodinamik açıdan analiz etmişlerdir. Biyogaz üretiminde süt endüstrisinin atık ürünü olan süt permatı değerlendirilmiştir. Sistemin enerji ve ekserji verimi sırasıyla %66,3 ve %78,2 olarak belirlenmiştir. Ayrıca sistemden 13.819 kW'a kadar güç üretiminin ve 104,1 kg/h hidrojen üretiminin mümkün olduğu belirtilmiştir. Bu sonuçlar endüstriyel atıkların değerlendirilmesiyle yenilenebilir enerji entegrasyonunun bir arada kullanıldığı sistemlerin verimli ve sürdürülebilir olduğunu göstermektedir.

Bu tez çalışmasında, düşük güneş radyasyonuna sahip Bilecik ilinin yenilenebilir enerji potansiyeli değerlendirilmiş ve bu potansiyelin bir multijenerasyon sistemi için uygulanabilirliği araştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, güneş enerjisi ve biyokütle kaynaklarının birlikte değerlendirildiği, ısı, güç ve hidrojen üretimi sağlayan bir sistemin termodinamik ve ekonomik açıdan incelenen bölge için ne ölçüde verimli ve uygulanabilir olduğunu belirlemektir. Dolayısıyla, literatürde yaygın olarak bulunan tek ürün odaklı tasarımların aksine bu çalışmada atık ısı değerlendirmesi ve çoklu üretim sistemlerinin birbirleriyle entegrasyonu ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir. Bu bakımdan bu tez çalışması literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

2. SİSTEM TASARIMI

Önerilen tez çalışmasında, Bilecik ili koşulları dikkate alınarak güneş ve biyogaz enerji potansiyeli değerlendirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, güneş enerjisi destekli iki kademeli bir güç çevrimi tasarlanmıştır. Tek kademeli sistemlerde atık ısının önemli bir kısmı çevreye atılmakta ve yüksek enerji potansiyeline sahip bu ısıdan yararlanılamamaktadır (Kılıç, 2019; Arslan ve Kılıç, 2021). Bu nedenle, atık ısının yeniden kullanılması amacıyla iki kademeli bir güç çevrimi önerilmiştir. Sistem, termodinamik ekonomik ve çevresel açılardan değerlendirilmiş; güneş enerjisinin fosil yakıtların yerine kullanılmasının doğru bir alternatif olduğu belirlenmiştir. Ancak Bilecik gibi düşük güneş radyasyonuna sahip bölgelerde, özellikle kış aylarında, tek başına yeterli bir çözüm oluşturmadığı görülmüştür. Bu nedenle, ikinci aşamada alternatif bir enerji kaynağı olarak biyokütle enerjisi değerlendirilmiştir. Bu bağlamda Bilecik'in biyokütle potansiyeli belirlenmiş ve buna bağlı olarak üretilebilecek biyogaz miktarı hesaplanmıştır. Elde edilen biyogazın bir kojenerasyon çevriminde kullanımı değerlendirilmiş ve bu sayede hem elektrik hem de ısı üretimi sağlanmıştır. Üçüncü aşamada, daha yüksek alev sıcaklığı ve yanma verimi elde edebilmek amacıyla yanma havasının hidrojen ve oksijen ile zenginleştirilmesi üzerinde durulmuştur. Bu kapsamda, PEM ve Katı Oksit Elektroliz Hücresi (SOEC) ünitelerinden elde edilen hidrojen ve oksijenin sistem performansına etkileri incelenmiştir. Son aşamada ise güneş ve biyokütle enerjisinin entegre edildiği, hidrojenle zenginleştirilmiş bir multijenerasyon sistemi tasarlanarak termodinamik ve ekonomik açıdan değerlendirilmiştir.

2.1. Güneş Enerjisi Destekli İki Kademeli Güç Çevrimi

Bilecik'in yıllık ortalama güneş radyasyonu değeri 1400-1550 kWh/m² aralığında olup, Türkiye'nin diğer bölgelerine kıyasla nispeten düşük seviyededir (GEPA, 2023). Ayrıca şehrin dağlık ve engebeli coğrafi yapısı; gölgelenme, ulaşım zorlukları ve elektrik şebekesine olan mesafe gibi güneş enerji santrali kurulumu açısından bazı kısıtlar oluşturmaktadır. Bununla birlikte, bölge güneş enerjisinden yararlanmak için hala dikkate değer bir potansiyele sahiptir.

Önerilen sistem dört temel bileşenden oluşmaktadır; güneş alanı (GA), TED sistemi, SRC ve ORC. Sisteme ait akış şeması Şekil 2.1'de verilmiştir.

akışkanın sıcaklık farkının korunmasına olanak tanımakta ve güç çevriminde daha istikrarlı çalışma koşulları sağlamaktadır.

Sistemin güç bloğu, tek kademeli Rankine çevrimine kıyasla daha yüksek güç üretimi ve verim elde etmeyi amaçlayan iki kademeli bir yapıdadır. Bu kısım ısı değiştiriciler (HE-II, HE-III, HE-IV), türbinler (T-I, T-II), pompalar (P-I, P-II) ve kondenserden oluşur. Güç üretiminin ilk kademesi olan SRC güneşlenme süresinde HE-III'ten, güneş ışığının olmadığı durumlarda ise HE-II'den beslenir. Ayrıca HE-IV ile SRC'den açığa çıkan atık ısı, ORC'de değerlendirilerek ek güç üretimi sağlanır. Bölgede soğutma suyu kaynağı bulunmadığından dolayı kondenserde hava ile soğutma dikkate alınmıştır.

Tek kademeli Rankine çevrimi için optimum performans ve maksimum verim sağlayan akışkanın R718 olduğu belirlenmiştir (Arslan ve Kılıç, 2021). Buna ek olarak ORC çevriminde soğutucu akışkan olarak R152a ve R600a değerlendirilmiştir. R152a, düşük kaynama noktasına, yüksek ısıl verim potansiyeline ve çevrim koşullarında iyi termodinamik uyuma sahip olması nedeniyle tercih edilmiştir (Bekiloğlu vd., 2019). R600a ise çevresel uyumun yanında düşük basınçta çalışmaya uygun ve ekonomik olarak avantajlı olduğundan dolayı tercih edilmiştir. Güneş enerjisi destekli iki kademeli güç çevriminde kullanılan akışkanların termodinamik özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

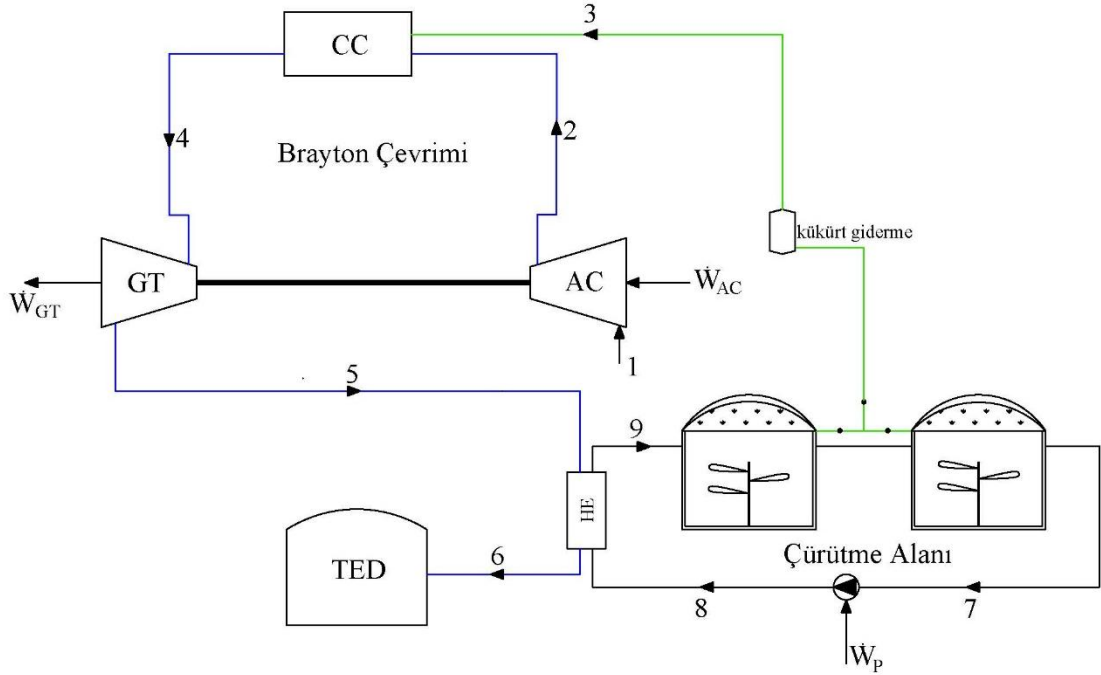
Tablo 2.1. Sistem tasarımında kullanılan akışkanların termodinamik özellikleri (SOLUTIA, 2020; REFPROP, 2010)

Özellik	Therminol VP-I	Eriyik tuz	R718	R152a	R600a
Kaynama sıcaklığı (°C)	257,0	-	100	-24	-11,7
Donma sıcaklığı (°C)	-	99	-	-	-
Kritik sıcaklık(°C)	430	-	374,0	113,3	134,7
Kritik basınç(MPa)	-	-	22,06	4,52	3,63
Yoğunluk(kg/m ³)	990,6	1920	795,2	812,3	508,7
Özgül ısı (kJ/kgK)	2,305	1,66	2,16	2,01	2,67

2.2. Biyogaz Destekli Kojenerasyon Çevrimi

Kojenerasyon sistemleri aynı yakıttan hem elektrik hem de ısı enerjisi üretebilen enerji dönüşüm sistemleridir. Bu tür sistemlerde biyogazın yakıt olarak kullanılması hem yenilenebilir enerjiye dayalı hem de çevre dostu üretim yaklaşımı sunarak fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır. Ayrıca biyogaz enerjisi, güneş enerjisi gibi süreksiz yenilenebilir enerji kaynaklarının aksine, kesintisiz ve depolanabilir bir enerji kaynağı özelliği taşıdığından dikkat çekmektedir.

Önerilen kojenerasyon sisteminin ana enerji kaynağı biyogazdır. Bilecik'te faaliyet gösteren Biosun Entegre Katı Atık Yönetimi tesisinden elde edilen veriler dikkate alınarak bölgenin biyogaz potansiyeli belirlenmiştir. Bu çalışmada biyokütle girdisi olarak belediye atıkları değerlendirilmiştir. Söz konusu atıklar; sığır gübresi, kümes hayvanı gübresi ve organik (mutfak) atıklardan oluşmaktadır. Tasarlanan sistem, biyokütle çürütme alanı, brayton çevrimi ve atık ısının değerlendirildiği bir alt ısı depolama sisteminden oluşur. Sistemin akış diyagramı Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Biyogaz destekli kojenerasyon sistemi

Tasarlanan sistemin çürütme alanında daha etkili biyogaz üretimi için iki aşamalı reaktör tank yapısı kullanılmıştır. Ön reaktörü tankında belirli bir süre fermente edilen organik substrat, daha sonra ikinci aşama reaktöre aktarılır ve burada fermantasyon süreci tamamlanır. Her iki tankta da sürekli olarak üretilen biyogaz ilk olarak kükürt giderme ünitesine gönderilir.

Biyogaz genellikle %0,05-0,3 oranında hidrojen sülfür içerir; bu bileşenler metaller üzerinde aşındırıcı etki yaratarak motor ve boru hatlarına zarar verebilir. Bu nedenle daha kaliteli bir yakıt için kükürdün biyogazdan ayrıştırılması gerekir. Bu aşamadan sonra biyogaz brayton çevrimindeki yanma odasına beslenir. Burada hava kompresöründe (AC) sıkıştırılan hava ile reaksiyona girerek yüksek sıcaklık ve basınçta yanma ürünleri oluşturur. Elde edilen bu gaz, gaz türbinini (GT) çalıştırarak elektrik üretimini sağlar. Türbin çıkışında hala önemli bir enerji potansiyeline sahip olan gaz ısısının bir kısmı reaktör tanklarını uygun çalışma

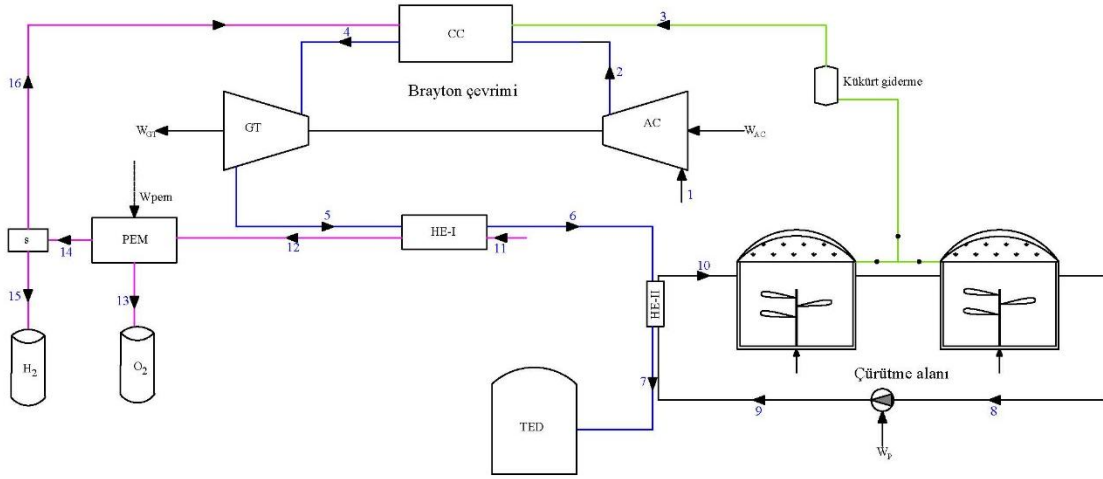
sıcaklığında tutmak için kullanılır. Kalan ısı bir TED sisteminde depolanarak konutların sıcak su ve ısınma ihtiyacı için değerlendirilir.

2.3. Biyogaz Destekli Hidrojen Üretimi

Son yıllarda yeşil hidrojen olarak adlandırılan, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla çalışan elektrolizörlerden elde edilen hidrojen ön plana çıkmıştır. Yenilenebilir tabanlı hidrojen üretiminde güneş, rüzgar ve biyokütle gibi kaynaklardan elde edilen elektrik PEM veya SOEC sistemleri aracılığıyla suyun elektrolizöründe kullanılır. Bu yöntemle elde edilen hidrojen, karbon salınımı gerçekleştirilmeden üretildiği için dikkat çeker. Bu çalışmada hem PEM hem de SOEC elektrolizöründen elde edilen hidrojen ve oksijen potansiyeli değerlendirilmiştir. Detaylı bilgi ve sistem açıklaması alt bölümde sunulmuştur.

2.3.1. PEM Tabanlı Hidrojen Üretimi

PEM tabanlı multijenerasyon sistemi, biyokütle çürütme alanı, brayton çevrimi, PEM ünitesi ve atık ısının depolandığı TED sisteminden oluşur. Bu sistemde biyogaz destekli kojenerasyon sistemine PEM elektroliz ünitesi entegre edilerek ısı ve elektrik üretimiyle birlikte hidrojen ve oksijen üretiminin de sağlandığı çok üretimli bir yapı oluşturulmuştur. Önerilen PEM tabanlı multijenerasyon sisteminin akış diyagramı Şekil 2.3' de verilmiştir.



Şekil 2.3. PEM tabanlı multijenerasyon sistemi

Şekil 2.3'de görüldüğü gibi biyokütle çürütme alanından elde edilen biyogaz, brayton çevriminin yanma odasına gönderilir ve burada basınçlı hava ve hidrojen ile tepkimeye girer. Yanma işlemi sonunda yüksek sıcaklık ve basınçtaki gaz türbini çalıştırarak elektrik üretilir. Brayton çevriminden elde edilen net güç PEM'i çalıştırmak için kullanılır. PEM elektrolizör, sisteme beslenen şebeke suyunu elektrik enerjisi yardımıyla ayrıştırarak hidrojen ve oksijen

kullanılır. Burada üretilen oksijen yanma odasına beslenir. Yanma odası çıkışında yüksek sıcaklıklı gaz ilk olarak bir ısı değiştirici vasıtasıyla akışkanı SOEC çalışma koşullarına uygun olacak şekilde ısıtır. Daha sonra kalan ısı ile gaz türbini çalıştırılarak elektrik üretilir. Burada üretilen elektrik direk şehir şebeke hattına gönderilir. Türbin çıkışındaki atık ısı, ısı değiştiricileri vasıtasıyla sistemin farklı aşamalarında geri kazanılır son olarak da TED sisteminde biriktirilerek konutların sıcak su ve ısınma ihtiyacının karşılanmasında kullanılır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Güneş Alanı

PTSC'ler tek eksenli güneş takip sistemine sahiptir. Bundan dolayı güneş ışınlarından en verimli şekilde yararlanabilmek için kolektörlerin, yatayda kuzey-güney ekseninde, doğu-batı doğrultusunda konumlandırıldığı varsayılmıştır. Bu konumun en büyük avantajı birden fazla yoğunlaştırıcı kolektör kullanıldığında çok küçük gölgelenme etkilerinin olmasıdır (Kalogirou, 2013). PTSC'lerin teknik özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. PTSC'lerin teknik özellikleri (Arslan ve Kılıç, 2021; Yüksel, 2018)

Özellik	Değer
Alıcı borunun dış çapı ($D_{o,r}$)	0,07 m
Alıcı borunun iç çapı ($D_{i,r}$)	0,066 (m)
Isı transfer katsayısı (U_L)	3,82 (W/m ² °C)
Alıcının içindeki ısı transfer katsayısı (h_{fi})	300 (W/m ²)
Alıcının termal iletkenliği (k)	16 (W/m °C)
Kaplama camın geçirgenliği (τ_{cover})	0,90
PTSC'nin geçirgenliği (τ_{PTSC})	0,94
Alıcının emiciliği (α_r)	0,87
Yakalama faktörü (γ)	0,95
Kolektör genişliği (W)	5,76 (m)
Kolektör uzunluğu (L)	15 (m)
Konsantrasyon oranı (CR)	47

Güneş ışınları yeryüzüne iki farklı biçimde ulaşır: direkt ve dolaylı. Eğer güneş ışınları atmosferde herhangi bir kırılma veya sapmaya uğramadan yeryüzüne gelirse direkt normal radyasyon (DNI), saçılma veya yansıma sonucu yön değiştirerek yeryüzüne ulaşırsa difüz radyasyonu denir. PTSC gibi yoğunlaştırma prensibine göre çalışan kolektörleri doğru analiz etmek için DNI değerini bilmek gerekir Difüz radyasyonun aksine DNI doğrudan hesaplanamaz. Toplam güneş radyasyonundan difüz radyasyonun çıkarılması ile belirlenir. Toplam güneş radyasyonu verileri meteoroloji istasyonlarından elde edilebilir veya ampirik denklemler kullanılarak tahmin edilebilir. Bilecik için ölçülen günlük toplam güneş radyasyonu değerleri Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM)'nden alınmıştır. 20 farklı ampirik denklem kullanılarak hesaplanan günlük toplam güneş radyasyonu değerleri, MGM'den elde edilen değerler ile istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda sunulan Kılıç ve Öztürk modeli istatistiksel olarak en uygun model olarak belirlenmiştir (Altıokka ve Arslan; 2023, Bakırcı, 2009). Bu model için belirleme katsayısı (R^2), ortalama mutlak yüzden hata (MAPE) ve

ortalama karekök hatası (RMSE) değerleri sırasıyla 0,97, 0,08, ve 1,21 olarak belirlendi ve bu sonuçlar hesaplanan değerler ile gerçek ölçümler arasında yüksek oranda bir uyum olduğunu göstermektedir (Altıokka ve Arslan, 2023). Buna göre yatay düzlemdeki günlük toplam güneş radyasyonu (H_t) aşağıdaki denklem ile hesaplanır;

$$\frac{H_t}{H_0} = a + b \cdot (S/S_0) \quad (D.1)$$

burada, H_0 , S ve S_0 sırasıyla günlük extraterrestrial radyasyon, günlük güneşleme süresi ve gün uzunluğunu ifade eder. a ve b deneysel katsayılarıdır ve şu şekilde belirlenir;

$$a = 0,103 + 0,000017 \cdot Z + 0,198 \cdot \cos(\varphi - \delta) \quad (D.2)$$

$$b = 0,553 + 0,165 \cdot \cos(\varphi - \delta) \quad (D.3)$$

burada, φ , δ ve Z sırasıyla enlem açısı, denklinasyon açısı ve yerin yüksekliğidir. Bilecik için denklem açısı 40° 'dir. δ , güneş ışınları ile ekvator düzlemi arasında meydana gelir ve $-23.45^\circ < \delta < 23.45^\circ$ arasında değer alır. δ aşağıdaki gibi hesaplanır (Kalogirou, 2013);

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+n}{365}\right) \quad (D.4)$$

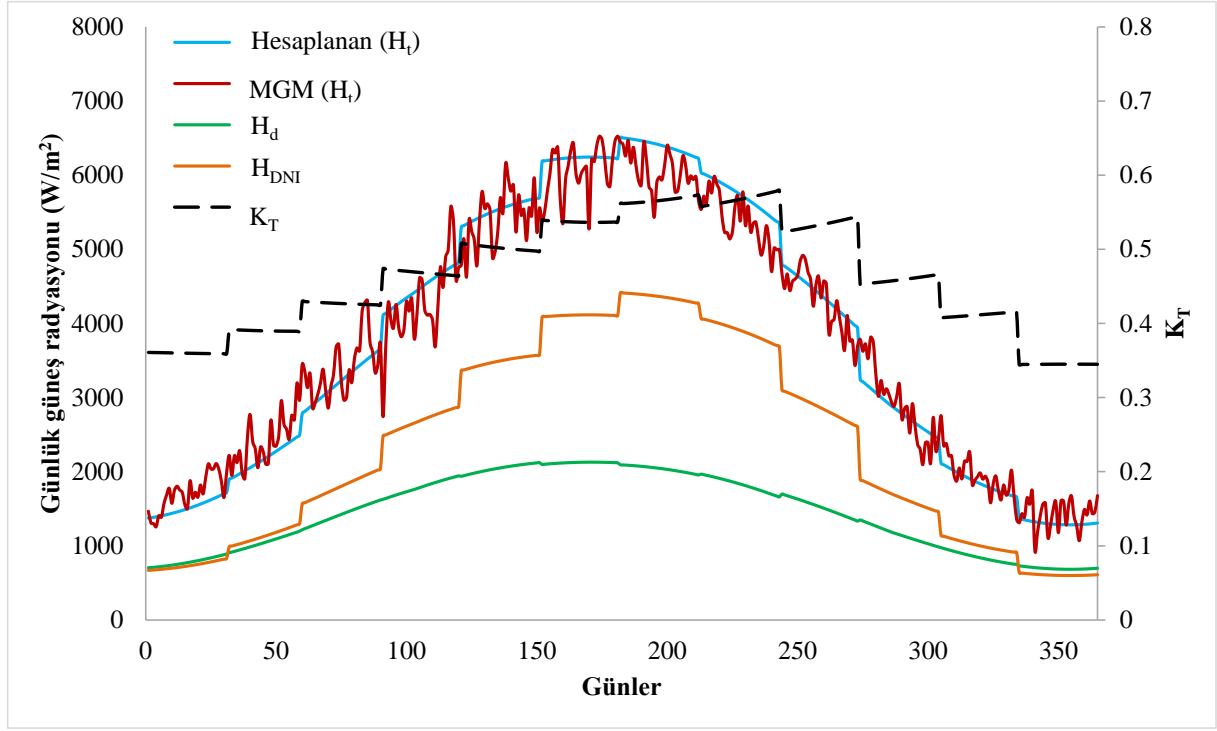
burada, n yılın gün sayısını ifade eder. Yatay düzleme düşen günlük difüz radyasyonu (H_d) hesaplamak için Barbaro modeli kullanıldı ve aşağıdaki gibi hesaplanır (Barbaro vd., 1978);

$$\frac{H_d}{H_t} = 1,0492 - 1,13246 \cdot K_T \quad (D.5)$$

burada, K_T bulutluluk göstergesidir. Buna göre günlük DNI (H_{DNI}) aşağıdaki gibi belirlenir;

$$H_{DNI} = H_t - H_d \quad (D.6)$$

MGM'den alınan toplam güneş radyasyonu değerleri ve hesaplanan H_t , H_d , H_{DNI} ve K_T değerleri Şekil 3.1de verilmiştir.



Şekil 3.1. Günlük toplam güneş radyasyon, direkt radyasyon, difüz radyasyon ve K_T değerleri (Erikgenoğlu vd., 2025)

Saatlik toplam güneş radyasyonu değerleri (I_t), Collares-Pereira ve Rabl tarafından geliştirilen denklem kullanılarak H_t değeri ile belirlenir;

$$I_t = H_t \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (D.7)$$

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (D.8)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (D.9)$$

burada ω ve ω_s sırasıyla söz konusu zaman içindeki saat açısı ve gün batımı saat açısıdır. ω aşağıda verilen denklem ile hesaplanabilir (Kalogirou, 2013);

$$\omega = (\text{solartime} - 12) \cdot 15 \quad (D.10)$$

Saatlik difüz radyasyon (I_d) Liu ve Jordan tarafından geliştirilen denklem ile belirlenebilir (Tiwari ve Tiwari, 2016);

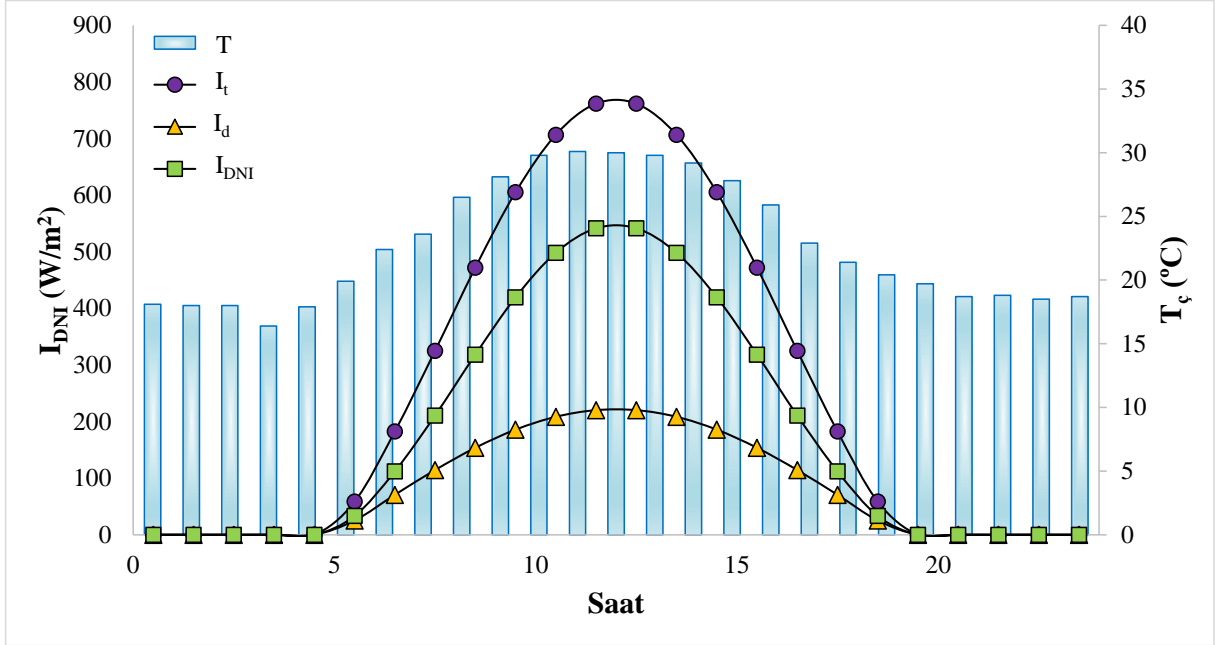
$$I_d = H_d \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (D.11)$$

Buna göre saatlik DNI (I_{DNI}) değeri aşağıda verilen denklem ile belirlenebilir;

$$I_{DNI} = I_t - I_d \quad (D.12)$$

Verilen denklemler kullanılarak güneş radyasyonu yılın her günü için saatlik bazda hesaplanmıştır. Önerilen sistemin analizi de yıl boyunca saatlik veriler dikkate alınarak dinamik

şekilde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek güneş potansiyeli temmuz ayında gözlenmiştir. Özellikle 1 Temmuz yılın en yüksek radyasyon değerine sahip günü olarak belirlenmiş olup, bu güne ait saatlik güneş radyasyonu ve çevre sıcaklığı değerleri Şekil 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. 1 Temmuz gününe ait saatlik DNI ve çevre sıcaklığı değerleri (Erikgenoğlu vd., 2025)

Şekil 3.2'de görüldüğü gibi 1 Temmuz günü saat 12:00-13:00 aralığında en yüksek DNI değeri 541 W/m² olarak belirlenmiştir. Bu zaman aralığında çevre sıcaklığı ise 29,8 °C'dir. Söz konusu koşullar, sistemin kurulu gücünü temsil eden tasarım noktası olarak kabul edilmiştir.

Tek bir kolektörden sağlanan faydalı ısı enerjisi (\dot{Q}_u) aşağıda verilen denklem ile hesaplanır (Duffie, 1991);

$$\dot{Q}_u = F_R \cdot A_r [S \cdot CR - \pi \cdot U_L \cdot (T_{11} - T_{\text{çevre}})] \quad (\text{D.13})$$

burada, F_R ısı taşıma faktörü, CR , PTSC'nin konsantrasyon oranı ve U_L , ısı kayıp katsayısıdır. T_{11} ve $T_{\text{çevre}}$ sırasıyla akışkanın kolektöre giriş sıcaklığını ve çevre sıcaklığını ifade eder. CR , aşağıda verilen denklem ile hesaplanır (Kalogirou, 2013);

$$CR = \frac{A_a}{A_r} = \frac{(D_r - D_{o,g})}{D_{o,g}} \quad (\text{D.14})$$

burada, A_a ve A_r sırasıyla açıklık alanı ve alıcı boru alanıdır. F_R , aşağıda verilen denklem ile hesaplanır (Kalogirou, 2013);

$$F_R = \frac{\dot{m}_{11} \cdot c_{p,therminol}}{A_r \cdot U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{U_L \cdot F' \cdot A_r}{\dot{m}_{11} \cdot c_{p,therminol}} \right) \right] \quad (D.15)$$

burada, F' , kolektör verim faktörüdür ve aşağıdaki gibi hesaplanır (Kalogirou, 2013);

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_{o,r}}{h_{fi} \cdot D_{i,r}} + \left(\frac{D_o}{2k} + \ln \frac{D_{o,r}}{D_{i,r}} \right)} \quad (D.16)$$

burada, $D_{i,r}$ ve $D_{o,r}$ sırasıyla alıcı borunun dış çapını ve iç çapını ifade eder. Alıcı tarafından absorbe edilen ısı (S) aşağıda verilen denklem ile hesaplanır (Kalogirou, 2013);

$$S = I_{DNI} \cdot \eta_r \quad (D.17)$$

burada, η_r optik verimi ifade eder ve aşağıdaki denklemde verildiği gibidir (Kalogirou, 2013);

$$\eta_r = \tau_{cover} \cdot \alpha_r \cdot \tau_{PTSC} \cdot \gamma \cdot k(\theta) \quad (D.18)$$

burada, τ_{cover} , kaplama camın geçirgenliği, α_r , alıcının emiciliği, τ_{PTSC} , PTSC'nin geçirgenliği, γ , yakalama faktörü ve $k(\theta)$ geliş açısı düzenleme faktörüdür ve aşağıdaki gibi hesaplanır (Kalogirou, 2013; Duffie ve Beckman, 1991);

$$k(\theta) = 1 - 2,2307 \times 10^{-4} \cdot \theta - 1,1 \times 10^{-4} \cdot \theta^2 + 3,18596 \times 10^{-6} \cdot \theta^3 - 4,85509 \times 10^{-8} \cdot \theta^4 \quad (D.19)$$

burada, θ geliş açısını ifade eder ve aşağıdaki gibi hesaplanır (Kalogirou, 2013);

$$\cos \theta = \sqrt{\cos^2 \theta_z + \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \omega} \quad (D.20)$$

burada, θ_z zenit açısını ifade eder ve aşağıdaki gibi hesaplanır (Kalogirou, 2013);

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta \quad (D.21)$$

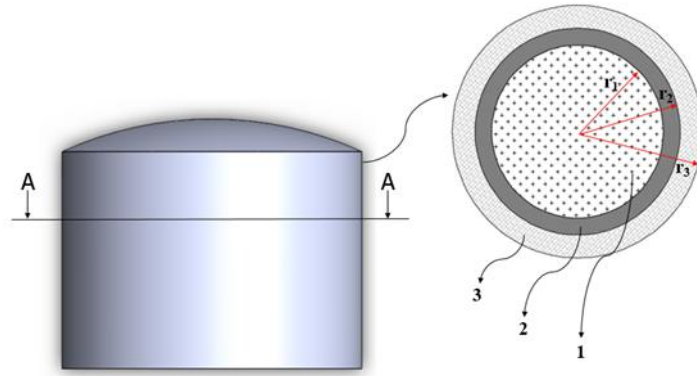
3.2. Termal Enerji Depolama Sistemi

TED sistemi, HST ve CST'den oluşur. Depolama tanklarının teknik özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. TED tanklarının teknik özellikleri

Özellik	Değer
Tank çapı (D_t)	30 (m)
Tank yüksekliği (H)	9,2 (m)
Tank hacmi (V)	6.616,31 (m ³)
Maksimum kütle (m)	10.162,65 (ton)

Depolama tanklarından çevreye olan ısı kayıplarını en aza indirmek amacıyla yalıtım uygulanmaktadır. Yalıtım malzemelerinin seçimi bu noktada kritik öneme sahiptir, yüksek ısı transfer katsayısına sahip malzemeler ısının daha kolay transferine neden olurken, düşük ısı transfer katsayısına sahip malzemeler ısı kayıplarını azaltarak sistem verimliliğini arttırmaktadır. Bu çalışmada, yüksek ısı yalıtım özelliği, hafifliği ve ekonomik olması nedeniyle kaplama malzemesi olarak cam yünü tercih edilmiştir. Ayrıca, TED sistemi için seçilen depolama malzemesi olarak, ağırlıkça %17,50 LiNO₃, %14,18 NaNO₃, %50,53 KNO₃ ve %17,78 NaNO₂'den oluşan erimiş tuz karışımıdır. Bu karışım, TED sistemleri için istenen bir dizi özelliğe sahiptir: daha düşük donma noktası (99 °C) daha yüksek ısı kapasitesi (1,66 kJ/kg.K), yüksek üst sıcaklık sınırı (425 °C), geliştirilmiş uzun vadeli termal kararlılık, düşük korozyon davranışı (15,75 µm/yıl), daha düşük maliyet ve daha yüksek termal iletkenlik (Mantha vd., 2013). Tasarlanan TED tankı modeli Şekil 3.3'de verilmiştir. Ayrıca tankın yapısal özellikleri de Tablo 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3. TED tankı modeli

Tablo 3.3. Termal enerji depolama tanklarının yapısal özellikleri (Mantha vd., 2013; Çengel vd., 2011)

Bileşenler	Açıklama	Malzeme	Yarıçap (m)	Kalınlık (mm)	k (W/mK)
1	Depolama malzemesi	Eriyik tuz	-	-	0,55
2	Paslanmaz çelik	AIS/316	15	30	13,4
3	Yalıtım	Cam yünü	-	100	0,038

TED sistemi üç aşamada çalışır; şarj, depolama ve boşaltma. Şarj modunda GA'dan elde edilen ısı depolanır. Şarj sırasında depolama tankına giren ısı (\dot{Q}_{HST}) aşağıdaki şekilde hesaplanır (Al-Sulaiman vd., 2012);

$$\dot{Q}_{HST} = \dot{Q}_{14} - \dot{Q}_{l,HST} \quad (D.22)$$

burada, $\dot{Q}_{l,HST}$ şarj süresi boyunca depolama tankından kaybedilen ısıyı ifade eder ve aşağıdaki gibi hesaplanır (Al-Sulaiman vd., 2012; Javadi vd., 2021);

$$\dot{Q}_{l,HST} = (UA)_{HST} \cdot (T_{HST} - T_a) \quad (D.23)$$

burada, U ve A sırasıyla depolama tankının ısı transfer katsayısı ve ısı transfer yüzey alanıdır. $(UA)_{HST}$ aşağıda verilen denklem ile hesaplanır (Arslan ve Kılıç, 2021; Arslan vd., 2009);

$$(UA)_{HST} = \frac{1}{R_{top}} \quad (D.24)$$

burada, R_{top} tankı duvarının toplam ısı direncidir. R_e , R_c , R_y , R_h sırasıyla eriyik tuzun, paslanmaz çeliğin, yalıtım malzemesinin ve dış havanın ısı direncini ifade eder. Aşağıda verilen denklem ile hesaplanır;

$$R_{top} = R_e + R_c + R_y + R_h \quad (D.25)$$

$$R_{top} = \frac{1}{(2\pi r_1 L) h_e} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_c} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L k_y} + \frac{1}{(2\pi r_3 L) h_h} \quad (D.26)$$

Gün boyunca tankın ısı kazancı aşağıda verilen denklem ile hesaplanır (Al-Sulaiman vd., 2012);

$$\sum Q_{HST} = \dot{Q}_{HST} \cdot \Delta t_s \quad (D.27)$$

burada, Δt_s toplam şarj süresini ifade eder. HST'nin sıcaklığı aşağıda verilen denklem ile belirlenebilir;

$$T_{HST} = \frac{\sum Q_{HST}}{c_{p,HST} \cdot m_{HST}} \quad (D.28)$$

burada m_{HST} , depolama tankının toplam kütesidir. Depolama tankının sıcaklık değişimi aşağıda verilen denklem ile hesaplanabilir (Al-Sulaiman vd., 2012);

$$T_{HST}^+ = T_{HST} + \frac{\Delta t_s}{m_{HST} \cdot c_{p,HST}} \cdot (-(UA)_{HST} \cdot (T_{HST} - T_c)) \quad (D.29)$$

Depolama süresince tanktan kaybolan toplam ısı aşağıda verildiği gibi hesaplanır;

$$Q_{HST,tkayıp} = m_{HST} \cdot c_{p,HST} \cdot (T_{HST} - T_{HST}^+) \quad (D.30)$$

Boşaltma durumunda toplam ısı aşağıdaki gibi hesaplanır (Al-Sulaiman vd., 2012);

$$Q_{15} = \sum Q_{HST} - Q_{HST,tlost} \quad (D.31)$$

burada Q_{15} , eriyik tuzun 15 noktasındaki ısı enerjisidir. Burada belirtilen hesaplama yöntemleri benzer şekilde CST'ye de uygulanabilir. Buna göre CST'den boşaltma süresi boyunca verilen ısı şu şekilde ifade edilir;

$$Q_{17} = \sum Q_{CST} - Q_{CST,tlost} \quad (D.32)$$

3.3. Isı Değiştiriciler

Isı değiştiriciler, farklı sıcaklıklardaki akışkanlar arasında doğrudan temas olmaksızın ısının etkin biçimde aktarılmasını sağlayan elemanlardır. Tasarım koşullarına ve akışkan özelliklerine bağlı olarak en yaygın kullanılan ısı değiştirici tipi gövde borulu ısı değiştirici ve plakalı ısı değiştiricidir. Kullanılan ısı değiştiricilerine ait matematiksel modeller bu bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir.

Isı değiştirici alanı (A_{HE}) aşağıda verilen denkle ile belirlenebilir (Lee, 2022; Bergman, 2011);

$$A_{HE} = \frac{\dot{Q}_{HE}}{U \cdot \Delta T_{LMTD}} \quad (D.33)$$

burada U ve ΔT_{LMTD} sırasıyla toplam ısı transfer katsayısı ve logaritmik sıcaklık farkıdır. ΔT_{LMTD} aşağıda verilen denklem ile hesaplanır (Bergman, 2011);

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h,g} - T_{c,\xi}) - (T_{h,\xi} - T_{c,g})}{\ln\left(\frac{T_{h,g} - T_{c,\xi}}{T_{h,\xi} - T_{c,g}}\right)} \quad (D.34)$$

Tasarlanan sistemde sıvı-buhar kullanımına uygun gövde borulu ısı değiştirici ve sıvı-sıvı kullanımına uygun plakalı ısı değiştirici kullanılmıştır: Tablo 3.4'de ısı değiştiricilerinin teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.4. Isı değiştircilerin teknik özellikleri (Lee, 2022; Bergman vd., 2011; Genceli, 2005)

Gövde borulu ısı değiştirici	
Özellik	Değer
Geçiş sayısı (n_{pass})	1
Uzunluk (L)	12 (m)
Tüpün iç çapı ($D_{i,t}$)	0,016 (m)
Tüpün dış çapı ($D_{o,t}$)	0,0508 (m)
Duvar kalınlığı (l)	0,0015 (m)
Tüp yerleşim açısı (θ)	30°
Bölme aralığı (e)	1,5 (m)
Adım oranı (PR)	1,25
Isı iletim katsayısı (k)	42,7 (m) (krom alaşımı)
Plakalı ısı değiştirici	
Özellik	Değer
Yükseklik (H)	0,6 (m)
Genişlik (W)	0,3 (m)
Plaka kalınlığı (t)	0,0007 (m)
Plakalar arası mesafe (b)	0,003 (m)
Isı iletim katsayısı (k)	13,5 (W/mK) (paslanmaz çelik AISI304)
Plaka sayısı (N_p)	20

3.3.1. Gövde Borulu Isı Değiştirciler

Gövde borulu ısı değiştirciler, bir gövde ve bu gövdenin içine yerleştirilmiş paralel borulardan oluşan ısı transfer elemeleridir (Genceli, 2005). Bu tip ısı değiştircilerde bir akışkan borulardan akarken, diğer akışkan boruları çevreleyen dış gövdeden akar. Bu çalışmadaki ısı değiştirici kondenser görevi görerek ORC'deki ısının havaya aktarılmasını sağlar. Gövde borulu ısı değiştirici için U değeri aşağıda kullanılan denklem ile belirlenir (Genceli, 2005).

$$U = \frac{D_{ç,t}}{D_{g,t}} \frac{1}{h_g} + \frac{\ln(D_{ç,t}/D_{g,t})}{2\pi kL} + \frac{1}{h_ç} + \frac{D_{ç,t}}{D_{g,t}} R_{fg}'' + R_{fç}'' \quad (D.35)$$

burada, $D_{g,t}$ ve $D_{ç,t}$ sırasıyla borunun iç ve dış çapını ifade eder. Kirlenme faktörü (R_f'') 0,0002 m²K/W kabul edilmiştir (Sundar vd., 2021). h_g , borunun ısı transfer katsayısıdır ve aşağıda verildiği gibi hesaplanır (Genceli, 2005);

$$h_g = \frac{Nu \cdot k}{D_{g,t}} \quad (D.36)$$

Nusselt sayısı (Nu), Reynold sayısına (Re) bağılı olarak belirlenebilir. Buna göre Re aşağıda verildiği gibi hesaplanır (Erdoğan vd., 2017);

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}_c}{\mu \cdot \pi \cdot D_{g,t} \cdot \frac{N_T}{n_{pass}}} \quad (D.37)$$

burada N_T ve n_{pass} sırasıyla toplam tüp sayısını ve geçiş sayısını ifade eder. N_T aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir (Kakac vd., 2002);

$$N_T = 0,785 \cdot \left(\frac{CTP}{CL} \right) \cdot \frac{D_s^2}{P_t^2 \cdot D_{ç,t}^2} \quad (D.38)$$

burada CTP , CL , D_s ve P_t sırasıyla tüp sayısı hesaplama sabiti, tüp yerleşim sabiti, gövde çapı ve boru aralığıdır. CTP ve CL değerleri ısı değiştiricisinin geometrisine bağılı olarak Tablo 3.5'den elde edilebilir.

Tablo 3.5. CTP ve CL değerleri (Kakac vd., 2022)

Boru yerleşim açısı	CL
90° ve 45° için	1
30° ve 60° için	0,85
Geçiş sayısı	CTP
Tek geçiş	0,93
İki geçiş	0,9
Üç geçiş	0,85

Boru aralığı aşağıda verilen denklem ile hesaplanabilir (Kakac vd., 2022);

$$P_t = PR \cdot D_{g,t} \quad (D.39)$$

Isı değiştiricisinin boru tarafındaki Nu sayısı aşağıda verilen denklem ile belirlenir (Genceli, 2005; Venkatesaperumal vd., 2022);

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3} \begin{cases} Re > 10^4 \\ 0,6 < Pr < 100 \end{cases} \quad (D.40)$$

Gövde tarafının ısı transfer katsayısı (h_o) aşağıda verildiği gibi hesaplanır (Genceli, 2005);

$$h_o = \frac{Nu \cdot k}{D_e} \quad (D.41)$$

burada D_e , eşdeğer çaptır. Bu değer yerleşim açısına bağılıdır ve 30° veya 60° yerleşim açısı için aşağıda verildiği gibi hesaplanır (Erdoğan vd., 2017);

$$D_e = \frac{1,27}{D_{\zeta,t}} (P_t^2 - 0,785 \cdot D_{\zeta,t}^2) \quad (D.42)$$

Gövdenin Re değeri aşağıda verilen denklem ile belirlenir (Erdoğan vd., 2017);

$$Re_{gövde} = \frac{D_e \cdot \dot{m}_h}{\mu \cdot A_s} \quad (D.43)$$

burada A_s , akış yönüne dik kesit alanıdır ve aşağıda verildiği gibidir (Erdoğan vd., 2017);

$$A_s = 0,639 \cdot (P_t - D_{\zeta,t}) \cdot e \cdot \sqrt{\frac{CL}{CTP}} \cdot \pi \cdot N_T \quad (D.44)$$

burada e , bölme aralığıdır. Gövdenin Nu değeri aşağıda verilen denklem ile hesaplanır (Erdoğan vd., 2017);

$$Nu = (0,037 \cdot Re_{gövde}^{0,8} - 871) \cdot Pr^{1/3} \left. \begin{array}{l} 5 \cdot 10^5 < Re_{gövde} < 10^7 \\ Pr = 0,6 - 50 \end{array} \right\} \quad (D.45)$$

3.3.2. Plakalı Isı Değiştiriciler

Plakalı ısı değiştiriciler, bir dizi ince metal plakanın birbirine paralel olarak dizilmesiyle oluşturulmuş olup, her bir plaka arasında sıcak ve soğuk akışkanın akışına izin veren kanallar bulunur. Plakalı ısı değiştiriciler için U değeri aşağıda verilen denklem ile hesaplanır (Kakac vd., 2002);

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{t}{k} + \frac{1}{h_o}} \quad (D.46)$$

burada t , k , ve h sırasıyla plaka kalınlığı, malzemenin ısıl iletkenliği ve ısı transfer katsayısını olarak tanımlanır. h değeri aşağıda verilen denklem ile belirlenir (Kakac vd., 2002);

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D_h} \quad (D.47)$$

burada D_h hidrolik çaptır ve aşağıda verildiği gibi hesaplanır (Sundar vd., 2021);

$$D_h = 2 \cdot b \quad (D.48)$$

burada b plakalar arasındaki ortalama mesafeyi ifade eder. Nu değeri aşağıda verilen denklem ile hesaplanır (Kakac vd., 2002);

$$Nu = 0,2 \cdot Re^{0,67} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_0}\right)^{0,1} \quad (D.49)$$

burada μ dinamik viskozitedir.

3.4. Biyogaz Üretimi ve Reaktör Tasarımı

Biyogaz, organik atıkların anaerobik fermantasyonu sonucu elde edilen metan (CH₄) ve karbondioksit (CO₂) ağırlıklı bir gazdır. Biyokütle, reaktöre gönderilmeden önce ön hazırlık aşamalarından geçmelidir. Ön işlemin ilk aşaması parçacık boyutunun küçültülmesidir. Pompa ve boru gibi tesisat elemanlarının tıkanmasını önlemek için çözeltinin parçacık boyutu minimum olmalıdır. Literatürde etkili biyogaz üretimi için önerilen parçacık boyutunun 0,008 mm-0,4 mm aralığında olması gerektiği belirtilmiştir. (Abbasi vd., 2011). Bir sonraki adım homojen bir karışım elde etmektir. Bunun için biyokütlenin belirli bir oranda su ile seyreltilmesi gerekir. Atık türleri farklı kimyasal özelliklere sahip oldukları için farklı seyreltme oranlarına sahiptir. (Abbasi vd., 2011). Buna göre bu çalışmada değerlendirilen atık miktarlarına ait özellikler Tablo 3.6'de verilmiştir.

Tablo 3.6. Bilecik'in atık miktarı ve özellikleri (ÇŞB, 2017; Erikgenoğlu ve Arslan, 2024)

Atık tipi	Atık miktarı (ton/gün)	KM (%)	OKM (%-KM)	Seyreltme oranı
Sığır gübresi	10	23	80	1:1
Kümes hayvanı gübresi	20	55	75	1:3
Organik atık	20	18	90	-

Atık miktarına göre biyogaz üretimi aşağıda verilen denklemler kullanılarak hesaplanır (Kaynarca vd., 2021);

$$V_{bio} = \sum m_g \cdot KM \cdot OKM \cdot \mu_{bio} \quad (D.50)$$

burada V_{bio} ve m_a günlük biyogaz üretimi ve atık miktarı olarak tanımlanır. KM , OKM ve μ_{bio} ise sırasıyla ıslak gübredeki kuru madde miktarı, kuru maddedeki organik kuru madde miktarı ve biyogaz verimidir. Üretilen metan gazı miktarı (V_{CH_4}), biyogaz üretim miktarı kullanılarak belirlenir (Kaynarca vd., 2021);

$$V_{CH_4} = V_{bio} \cdot C_{CH_4} \quad (D.51)$$

burada C_{CH_4} yüzde (%) metan içeriğini ifade eder. Biyogaz miktarının hesaplamasında kabul edilen değerler Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7. Biyogaz hesabında kabul edilen değerler (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2017; Erikgenoğlu ve Arslan, 2024)

Atık tipi	μ_{bio} (lt/kg-OKM)	C_{CH_4} (%)	V_{bio} (m ³ /gün)
Sığır gübresi	450	55	828
Kümes hayvanı gübresi	400	62	3.300
Organik atık	700	60	2.268
Toplam			6396

Bir biyogaz tesisi; reactor tankı, yalıtım malzemesi, karıştırıcı, pompa ve borular gibi çeşitli temel elemanlardan oluşur. Ön hazırlık aşamasında parçalanarak uygun boyuta getirilen atıklar, su ile karıştırılarak homojen bir karışım oluşturulur. Hazırlanan bu karışım daha sonra çürütücü tanka gönderilir. Tank içerisinde anaerobik koşullar altında bakteriler, organik maddeyi ayrıştırarak metan ve karbondioksit ağırlıklı biyogaz üretirler. Bu süreçte hidrolik bekleme süresi (HBS) denilen süre boyunca tank içerisindeki substratın sürekli karıştırılmasıyla biyogaz üretimi gerçekleşir. HBS, biyogaz üretimini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Mezofilik sıcaklık aralığında çalışan sistemlerde bu süre 25-40 gün arasındadır (Garkoti vd., 2024). Bu süre bakterilerin organik maddeyi tam olarak parçalayabilmesi ve stabil bir gaz üretim oranı elde edilmesini açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada 28 gün olarak kabul edilmiştir.

Çürütücü tank tasarımındaki ilk aşama, belirlenen gübre miktarına göre tank hacminin belirlenmesidir. Buna göre tank hacmi aşağıda verilen denklem ile hesaplanır (Akbulut vd., 2021);

$$V_T = (m_g + \sum_{i=1}^n m_s) \cdot HBS \quad (D.52)$$

Burada V_T çürütücü tank hacmini (m³), m_s ise yardımcı substrat miktarını (ton/gün) ifade eder. Çürütücü tankın çapı ise aşağıda verilen denklem ile belirlenebilir (Akbulut vd., 2021);

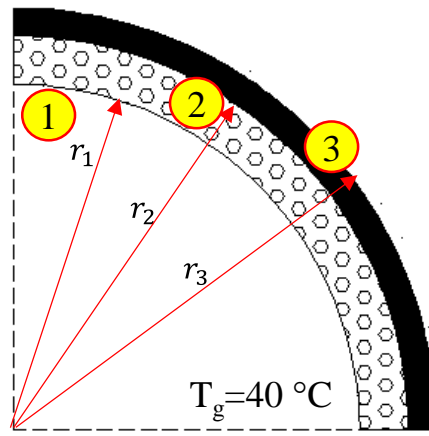
$$D^2 = \frac{4 \cdot V_T}{H \cdot \pi} \quad (D.53)$$

Burada D ve H sırasıyla tank çapı ve tank yüksekliğidir. Bu çalışmada tank yüksekliği sabit kabul edilerek tank çapı hesaplanmıştır. Çürütme sonrası depolama alanının boyutları aşağıda verilen denklem kullanılarak belirlenmiştir (Akbulut vd., 2021);

$$V_{pds} = (m_g + \sum_{i=1}^n m_s) \cdot \left(\frac{t_s}{12}\right) - V_T \quad (D.54)$$

Burada V_{pds} ve t_s sırasıyla sindirim sonrası hacim (m^3) ve depolama süresidir. Biyogaz depolama bölümünün hacmi toplam tank hacminin 5:1'i kabul edilmiştir.

Reaktör tankı sıcaklığı, biyogaz üretimini etkileyen en kritik parametrelerden biridir. Çürüme için en uygun sıcaklık 30-40 °C arasında değişen mezofilik koşullar altında oluşur (Vasan vd., 2024). Bu çalışmada 40 °C kabul edilmiştir. Ayrıca mezofilik bakteriler ani sıcaklık değişimlerine aşırı tepki verdiği için, tank sıcaklığının stabil olması gerekir. Sabit bir çalışma sıcaklığı için reaktör tankının yalıtılması şarttır. Buna göre uygun bir yalıtım kalınlığı belirlenmelidir. Çürütücü tankın kesit görünümü ve malzeme özellikleri Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Reaktör tankı kesiti ve malzeme özellikleri

Şekil 3.4'de görüldüğü gibi tank üç bölümden oluşur; substrat alanı (1), beton duvar (2) ve yalıtım malzemesi (3). Beton duvar ve yalıtım malzemesinin (ekstrüde polistiren) ısı iletim katsayısı sırasıyla 0,79 W/mK ve 0,034 W/mK'dir (Çengel vd., 2011). Kritik yarıçap (r_{kr}), yalıtım malzemesi kalınlığının belirlenmesinde önemli bir faktör olup aşağıdaki denklem ile hesaplanır;

$$r_{kr} = \frac{k_3}{h_h} \quad (D.55)$$

burada k_3 ve h_h sırasıyla yalıtım malzemesinin iletim katsayısı ve havanın taşınım katsayısıdır (5 W/m²K) (Çengel vd., 2011). Buna göre yapılan hesaplamalar sonucunda r_{kr} 7mm olarak belirlenmiştir. Bu değer üzerinde seçilen herhangi bir yalıtım kalınlığı tank için uygun yalıtım kalınlığını ifade eder. Bu nedenle, literatürdeki çalışmalar göz önünde bulundurularak yalıtım kalınlığı 80 mm olarak kabul edilmiştir (Akbulut vd., 2021).

Çürütme tanklarının enerji dengesi aşağıda verildiği gibidir (Akbulut vd., 2021);

$$\rho_g \cdot V_T \cdot c_{p,g} \cdot \frac{dT_g}{dt} = \dot{Q}_{th} - \dot{Q}_g - \dot{Q}_T \quad (D.56)$$

burada ρ_g , V_T ve $c_{p,g}$ sırasıyla gübrenin yoğunluğu (kg/m^3), çürütücü tankın hacmi (m^3), gübrenin özgül ısısı ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$)dir. \dot{Q}_{th} , \dot{Q}_g ve \dot{Q}_T ise sırasıyla biyogazdan elde edilen ısı, gübreye verilen ısı oranı ve çürütü tanktan olan toplam ısı kayıplarıdır. \dot{Q}_T aşağıdaki denklemde verildiği gibi hesaplanır (Akbulut vd., 2021);

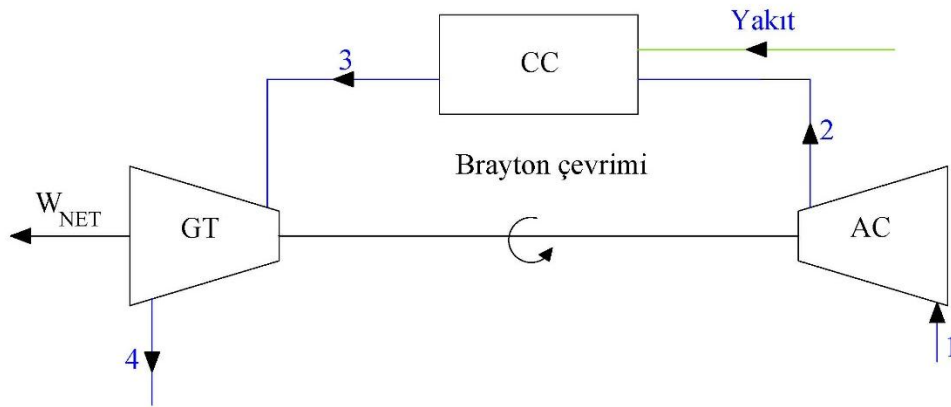
$$\dot{Q}_T = \frac{T_g - T_c}{\frac{1}{2\pi r_1 H h_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi H k_2} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi H k_3} + \frac{1}{2\pi r_3 H h_h}} \quad (D.57)$$

burada T_g , çalışma sıcaklığını ifade eder. \dot{Q}_g ise aşağıdaki denklem ile belirlenir (Akbulut vd., 2021);

$$\dot{Q}_g = m_g \cdot c_{p,g} \cdot (T_g - T_c) \quad (D.58)$$

3.5. Brayton Çevrimi

Brayton çevrimi diğer bir adıyla gaz çevrimi genellikle açık çevrime göre çalışır. Brayton çevriminin akış diyagramı Şekil 3.5’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi çevre koşullarındaki hava kompresörde sıkıştırılarak sıcaklık ve basıncı yükseltilir. Yüksek basınçlı hava daha sonra yanma odasına gönderilir ve burada yakıt ile tepkimeye girerek yanar. Yanma sonucu oluşan yüksek sıcaklıktaki gaz, türbinde genişlerken güç üretir. Türbinden çıkan gazlar tekrar çevrime sokulmaz ve atmosfere atılır (Çengel vd., 2011)

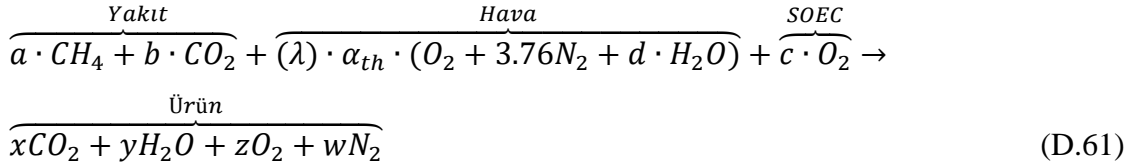
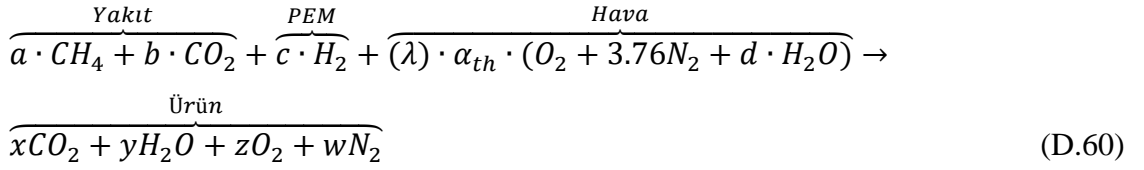
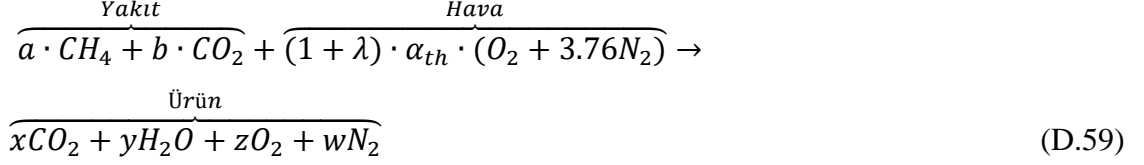


Şekil 3.5. Brayton çevrimi akış diyagramı

Bu çalışmada yakıt olarak biyogaz kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak biyogaz bileşimi %60 metan (CH_4) ve %40 karbondioksit (CO_2) olarak kabul edilmiştir (Gholizadeh vd., 2019; Huang vd., 2024). Bu çalışmada yanma işlemi üç farklı şekilde değerlendirilmiştir;

- i. Biyogazın yalnızca hava ile yakılması
- ii. Yanma işlemine belirli oranlarda hidrojen eklenmesi
- iii. Yanma işlemine belirli oranlarda oksijen eklenmesi

Üç farklı durumda yanma odasında gerçekleşen tepkime denklemleri sırasıyla aşağıda verilmiştir.



burada a ve b sırasıyla CH_4 ve CO_2 miktarını ifade eder. c ise tepkimeye eklenen hidrojen veya oksijen miktarıdır. λ , hava fazlalık katsayısıdır ve biyogazın havayla tepkimeye girdiği denklemde %250 olarak kabul edilmiştir (Karaali and Ozturk, 2007). Yanmaya ve α_{th} sırasıyla ve stokiometrik hava katsayısıdır. x , y , z ve w ise ürünlerdeki CO_2 , H_2O , O_2 ve N_2 'nin mol sayısını ifade eder. Tepkimede bilinmeyen katsayılar kütle denkliği uygulanarak belirlenmiştir.

3.6. PEM Ünitesi

PEM elektrolizörler, suyu elektrik enerjisi yardımıyla hidrojen (H_2) ve oksijene (O_2) ayıran cihazlardır. Bu sistemler düşük sıcaklıklarda (genellikle 50-80 °C aralığında) yüksek verim sağlaması, hızlı başlatılabilmesi ve kompakt tasarımlarından dolayı günümüzde hidrojen üretiminde en çok tercih edilen elektroliz yöntemlerinden biridir (Hu vd., 2022). PEM'de anot ve katot elektrotlarında gerçekleşen tepkimeler ve net tepkime aşağıda verildiği gibidir;



PEM elektrolizöründe birim alan başına molar hidrojen (\dot{N}_{H_2}) ve oksijen (\dot{N}_{O_2}) üretim hızı aşağıda verilen denklem ile belirlenebilir (Arslan ve Arslan, 2024);

$$\dot{N}_{H_2} = \frac{J}{2F} \quad (D.65)$$

$$\dot{N}_{O_2} = \frac{J}{4F} \quad (D.66)$$

burada F ve J sırasıyla faraday sabitini ve akım yoğunluğunu ifade eder. PEM için birim alan başına elektrik girişi ise aşağıda verilen denklem ile belirlenir (Toker vd., 2022);

$$\dot{W}_{PEM} = J \cdot V \quad (D.67)$$

burada V , PEM'in gerekli potansiyelidir ve aşağıda verilen denklem ile hesaplanır (Ni vd., 2006);

$$V = V_0 + \Delta V_{act,a} + \Delta V_{act,c} + \Delta V_{ohm} \quad (D.68)$$

burada V_0 , $\Delta V_{act,a}$, $\Delta V_{act,c}$ ve ΔV_{ohm} sırasıyla tersinir potansiyel, anotun aktivasyon aşırı potansiyeli, katodun aktivasyon aşırı potansiyeli ve ohmik aşırı potansiyeldir. V_0 , Nernst denklemiyle verilir ve aşağıdaki gibidir (Thampan vd., 2001);

$$V_0 = 1,23 - 0,9 \cdot 10^{-3}(T - T_0) + \frac{RT}{4F} \ln(P_{H_2}^2 \cdot P_{O_2}) \quad (D.69)$$

burada, T ve T_0 , çalışma sıcaklığı ve referans sıcaklık, P ve P_0 hidrojen ve oksijenin basıncıdır. Akım yoğunluğu (J) ve genel ohmik direnç (R_{PEM}) açısından, t kalınlığındaki bir elektrolitin ohmik aşırı potansiyeli aşağıdaki gibi verilir;(Gurau vd., 2000; Chan ve Xia, 2002);

$$\Delta V_{ohm} = J \cdot R_{PEM} \quad (D.70)$$

$$R_{PEM} = \int_0^t \frac{dx}{\sigma[\lambda(x)]} \quad (D.71)$$

$$\sigma[\lambda(x)] = [0,5139 \cdot \lambda(x) - 0,326] \cdot e^{1268 \left(\frac{1}{303 T} \right)} \quad (D.72)$$

$$\lambda(x) = \frac{\lambda_a - \lambda_c}{t} x + \lambda_c \quad (D.73)$$

$$J = J_{0,i} \cdot \left(e^{\frac{a \cdot z \cdot F \cdot \Delta V_{act,i}}{RT}} - e^{\frac{(1-a) \cdot z \cdot F \cdot \Delta V_{act,i}}{RT}} \right) \quad i = a, c \quad (D.74)$$

$$\Delta V_{act,i} = \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{J}{2J_{0,i}} + \sqrt{\left(\frac{J}{2J_{0,i}} \right)^2 + 1} \right) \quad i = a, c \quad (D.75)$$

$$J_{0,i} = J_i^{ref} \cdot e^{-\frac{E_{act,i}}{RT}} \quad i = a, c \quad (D.76)$$

PEM'in modellenmesinde kullanılan parametrelere ilişkin kapsamlı bilgi Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.8. PEM'in özellikleri (Aslan ve Aslan, 2024)

Parametre	Değer
Çalışma sıcaklığı (T)	353 K
P_{H_2} ve P_{O_2}	1 atm
Simetrik factor (a)	0.5
Tepkime başına elektrot sayısı (z)	2
Universal gaz sabiti (R)	8.3145 J/molK
Faraday sabiti (F)	96,486 C/molK
Anot su içeriği (λ_a)	14
Katot su içeriği (λ_c)	10
Elektroliz kalınlığı (t)	50 μm
Anot ön üssel faktörü (J_a^{ref})	$3.6 \cdot 10^{-5} \text{ A/m}^2$
Katot ön üssel faktörü (J_c^{ref})	10 A/m^2
Anot aktivasyon enerjisi ($E_{act,a}$)	76 kJ/mol
Katot aktivasyon enerjisi ($E_{act,c}$)	18 kJ/mol

3.7. SOEC Ünitesi

SOEC'in anod ve katot bölümünde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonları aşağıda verildiği gibidir (Arslan vd., 2022);



SOEC'de ayrıştırma işlemi hem elektrik enerjisini (ΔG) hem de ısı enerjisini ($T\Delta S$) içeren toplam enerji (ΔH) girişini gerektirir (Arslan vd., 2022; Smolinka, 2015);

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (D.80)$$

Kinetik ve potansiyel enerji değişimi, basınç düşüşü ve geçişle ilgili aşırı potansiyellerin etkileri ihmal edilebilir olarak kabul edilmiştir. Buna göre SOEC'in çalışma voltajı (V_{SOEC}) aşağıdaki denklemde verildiği gibi belirlenebilir (Ni vd., 2007);

$$V_{SOEC} = V_{rev} + V_{act} + V_{con} + V_{ohm} \quad (D.81)$$

Burada V_{act} ve V_{con} sırasıyla elektrokimyasal hücrede anot ve katot ara yüzlerinde oluşan aktivasyon ve konsantrasyon aşırı potansiyellerini tanımlar. Sistemdeki ohmik kayıplar, V_{ohm} olarak ifade edilir ve elektrot katmanları, elektrolit ve ara bağlantılar boyunca oluşan direnç etkilerini açıklar. Her SOEC ünitesinin denge potansiyeli (V_{rev}), ilgili çalışma koşulları altında Nernst denklemine göre değerlendirilir (Hernández-Pacheco vd., 2004);

$$V_{rev} = V_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2}^o \sqrt{P_{O_2}^o}}{P_{H_2O}^o \sqrt{P_{ref}}} \right) \quad (D.82)$$

burada $P_{H_2}^o$, $P_{O_2}^o$ ve $P_{H_2O}^o$ hücre girişindeki hidrojen, oksijen ve su buharının kısmi basıncına karşılık gelirken, P_{ref} standart referans basıncı tanımlar. Standart hücre potansiyeli (V_0) aşağıdaki gibi tanımlanır (Hosseini, 2020);

$$V_0 = 1,253 - 2,4516 \hat{A} \cdot 10^4 T \quad (D.83)$$

Aktivasyon aşırı potansiyeli ($V_{act,i}$), anot ve katot yüzeylerindeki elektrokimyasal reaksiyonların kinetiğinden kaynaklanır. Butler-Volmer denklemi kullanılarak değerlendirilir (Hernández-Pacheco vd., 2004);

$$J = J_{0,i} \left[\exp \left(\frac{\alpha n F V_{act,i}}{RT} \right) - \exp \left(- \frac{(1-\alpha) n F V_{act,i}}{RT} \right) \right] \quad (D.84)$$

burada α yük transfer katsayısıdır -su elektrolizörü için genellikle 0,5 dir (Choi vd., 2004) ve n reaksiyon başına transfer edilen elektron sayısıdır. Değişim akım yoğunluğu (J_0) aşağıda verilen denklem ile belirlenir (Ni vd., 2007);

$$J_{0,i} = \gamma_i \exp \left(- \frac{E_{act,i}}{RT} \right) \quad (D.85)$$

burada γ_i ve $E_{act,i}$ sırasıyla ilgili elektrot tarafı için ön üstel katsayıyı ve aktivasyon enerjisini tanımlar. Aktivasyon aşırı potansiyeli (V_{act}) aşağıda verildiği gibi hesaplanır (Ni vd., 2007);

$$V_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_{0,i}} \right) \quad (D.86)$$

Fick'in difüzyon modeli (Ni vd., 2006), her iki elektrottaki konsantrasyon aşırı potansiyelini (V_{con}) tahmin etmek için kullanılır. Katot ve anot bileşenleri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır;

$$V_{con,c} = \frac{RT}{2F} \ln \left[\left(\frac{1 - \frac{JRT\delta_c}{2FD_{H_2O}^{eff} P_{H_2}^l}}{1 + \frac{JRT\delta_c}{2FD_{H_2O}^{eff} P_{H_2O}^l}} \right) \right] \quad (D.87)$$

$$V_{con,a} = \frac{RT}{2F} \ln \left[\left(1 + \frac{JRT\delta_a}{4FD_{O_2}^{eff} P_{O_2}^I} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (D.88)$$

burada δ_c ve δ_a sırasıyla katot ve anot katmanlarının kalınlıklarını ifade eder. $P_{H_2}^I$, $P_{H_2O}^I$ ve $P_{O_2}^I$, ilgili elektrot ara yüzlerindeki hidrojen, buhar ve oksijenin kısmi basınçlarını temsil eder. Buhar ve oksijen için etkin difüzyon katsayıları sırasıyla $D_{H_2O}^{eff}$ ve $D_{O_2}^{eff}$ ile gösterilir. $D_{O_2}^{eff}$ aşağıda verildiği gibi belirlenir (Ni vd.,2006);

$$\frac{1}{D_{O_2}^{eff}} = \frac{\zeta}{\varepsilon} \left(\frac{1}{D_{O_2,M}} + \frac{1}{D_{O_2,k}} \right) \quad (D.89)$$

burada, ζ , porozite, ε , kıvrımlık, $D_{O_2,M}$ ve $D_{O_2,k}$ moleküler ve Knudsen difüzyonlarıdır. $D_{O_2,k}$ kineik teori ile verilebilir (Visitdumrongkul vd., 2016);

$$D_{O_2,k} = \frac{4}{3} r \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_{O_2}}} \quad (D.90)$$

burada r ve M_{O_2} sırasıyla gözenek çapı ve buharın molekül ağırlığıdır. O_2 ideal gaz olarak kabul edilirse, $D_{O_2,M}$ aşağıda verildiği gibi hesaplanır (Hernández-Pacheco vd., 2004);

$$D_{O_2,M} = 0,0026 \frac{T^{\frac{3}{2}}}{(M_{O_2})^{\frac{1}{2}} P_{ref} \sigma_{O_2}^2 \Omega_{D,O_2}} \quad (D.91)$$

burada $\sigma_{O_2}^2$, oksijenin moleküler çarpışma çapıdır (=3,467) (Hernández-Pacheco vd., 2004). Çarpışma integrali (Ω_{D,O_2}) aşağıdaki gibi hesaplanır (Hernández-Pacheco vd., 2004).

$$\Omega_{D,O_2} = \frac{1,06036}{(T^*)^{0,561}} + \frac{0,193}{\exp(0,47635T^*)} + \frac{1,03587}{\exp(1,52996T^*)} + \frac{1,76474}{\exp(3,89411T^*)} \quad (D.92)$$

burada T^* aşağıdaki gibidir;

$$T^* = \frac{\kappa T}{\varepsilon_{O_2}} \quad (D.93)$$

burada κ , Boltzmann sabitini ve ε_{O_2} , oksijen moleküllerine özgü Lennard-Jones enerji parametresini ifade eder. Hesaplamalarda kullanılan değer aşağıda verildiği gibi elde edilir (Hernández-Pacheco vd., 2004):

$$\frac{\varepsilon_{O_2}}{\kappa} = 106.7 \quad (D.94)$$

Katot tarafı içinde benzer bir formülasyon kullanılmış olup aşağıdaki denklemde verilmiştir;

$$\frac{1}{D_{H_2O}^{eff}} = \zeta \left(\frac{1}{D_{H_2O-H_2}} + \frac{1}{D_{H_2O,k}} \right) \quad (D.95)$$

Knudsen difüzyon katsayısı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$D_{H_2O,k} = \frac{4}{3} r \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_{H_2O}}} \quad (D.96)$$

burada M_{H_2O} buharın moleküler ağırlığını ifade eder. İkili gaz fazı difüzyonunun tahmini, moleküler etkileşimleri ve sıcaklık bağımlılığını dikkate alan Chapman-Enskog modeline dayanarak gerçekleştirilir (Visitdumrongkul vd., 2016);

$$D_{H_2O-H_2} = 0,00133 \left(\frac{1}{M_{H_2O}} + \frac{1}{M_{H_2}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{P_{ref} \sigma_{H_2O-H_2}^2 \Omega_{D,H_2O-H_2}} \quad (D.97)$$

burada M_{H_2} hidrojenin molekül ağırlığıdır. İkili çarpışma çapı ($\sigma_{H_2O-H_2}$) hidrojenin $\sigma_{H_2}=2.827$) ve buharın ($\sigma_{H_2O} = 2.641$) bireysel çaplarının ortalaması ile yaklaşık olarak hesaplanır (Visitdumrongkul vd., 2016):

$$\sigma_{H_2O-H_2} = \frac{\sigma_{H_2} + \sigma_{H_2O}}{2} \quad (D.98)$$

Ω_{D,H_2O-H_2} , ikili difüzyon çarpışma integralidir. Burada T^* aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$T^* = \frac{\kappa T}{\varepsilon_{H_2O-H_2}} \quad (D.99)$$

burada $\varepsilon_{H_2O-H_2}$, ikili karışımın Lennard-Jones enerji parametresi, buhar ve hidrojenin ilgili parametrelerinden türetilmiştir ve aşağıdaki gibi verilir;

$$\frac{\varepsilon_{H_2O-H_2}}{\kappa} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{H_2O}}{\kappa} \frac{\varepsilon_{H_2}}{\kappa}} \quad (D.100)$$

burada $\varepsilon_{H_2O} = \kappa \cdot 809.1$ ve $\varepsilon_{H_2} = \kappa \cdot 59.7$ 'dir (Hernández-Pacheco vd., 2004). Ohmik aşırı potansiyel, elektrotlarda, elektrolitlerde ve ara bağlantı bölgelerinde karşılaşılan elektronik ve iyonik direncin birleşik etkilerinden kaynaklanır. Aşağıdaki şekilde formüle edilir (Arslan vd., 2022);

$$V_{ohm} = \left(\frac{\delta_c}{\tau_c} + \frac{\delta_e}{\tau_e} + \frac{\delta_a}{\tau_a} + 2 \frac{\delta_i}{\tau_i} \right) J \quad (D.101)$$

burada δ ve τ sırasıyla hücre bileşenlerinin fiziksel kalınlığını ve elektriksel iletkenliğini ifade eder. c , e , a ve i alt indisleri sırasıyla katot, elektrolit, anot ve ara bağlantıyı temsil eder. Elektriksel iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişimi aşağıdaki ampirik ilişkilere dayanarak hesaplanır (Ferguson vd., 1996);

$$\tau_c = \frac{4.2 \cdot 10^7}{T} \exp\left(\frac{-1200}{T}\right) \quad (\text{D.102})$$

$$\tau_e = 3.34 \cdot 10^4 \exp\left(\frac{-10300}{T}\right) \quad (\text{D.103})$$

$$\tau_a = \frac{9.5 \cdot 10^7}{T} \exp\left(\frac{-1150}{T}\right) \quad (\text{D.104})$$

$$\tau_i = \frac{9.3 \cdot 10^5}{T} \exp\left(\frac{-1100}{T}\right) \quad (\text{D.105})$$

SOEC ünitesinin teknik özellikleri Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.9. SOEC ünitesinin teknik özellikleri (Ferguson vd., 1996; AlZahrani ve Dincer, 2017; Ni vd., 2006)

Özellik	Değer
P_{SOEC}	101,325 kPa
H ₂ O mol kesri	%90
O ₂ mol kesri	%100
Buhar kullanım faktörü	%60
Oksijenin etkili difüzyon katsayısı ($D_{O_2}^{eff}$)	$2,8112 \cdot 10^{-6}$
Hidrojenin etkili difüzyon katsayısı ($D_{H_2O}^{eff}$)	$1,483 \cdot 10^{-6}$
Anotun aktivasyon enerjisi ($E_{act,a}$)	120.000 J/mol
Katotun aktivasyon enerjisi ($E_{act,c}$)	100.000 J/mol
Anotun ön üstel katsayısı (γ_a)	$2,051 \cdot 10^9$ A/m ²
Katotun ön üstel katsayısı (γ_c)	$1,344 \cdot 10^{10}$ A/m ²
Hücre sayısı	400

3.8. Isı Yükünün Belirlenmesi

Brayton çevriminden elde edilen atık ısı, konutların ısınma ve sıcak su ihtiyacı için kullanılabilir. Yıl boyunca sürekli sıcak su talebi varken, ısınmaya yalnızca kış aylarında ihtiyaç duyulur. Bu iki durum için gerekli ısyı karşılamak üzere sisteme bir TED sistemi entegre edilmiştir. TED sistemi sayesinde atık ısı tankta depolanır. Bu ısı kış aylarında kış aylarında konutların hem sıcak su hem de ısınma ihtiyacı için kullanılabilirken, yaz aylarında sadece sıcak su ihtiyacı için kullanılabilir. Bir konutun ısı ihtiyacı aşağıda verilen denklem ile belirlenebilir;

$$\dot{Q}_{ihtiyaç} = \sum_i (U \cdot A \cdot \Delta T)_i \quad (\text{D.106})$$

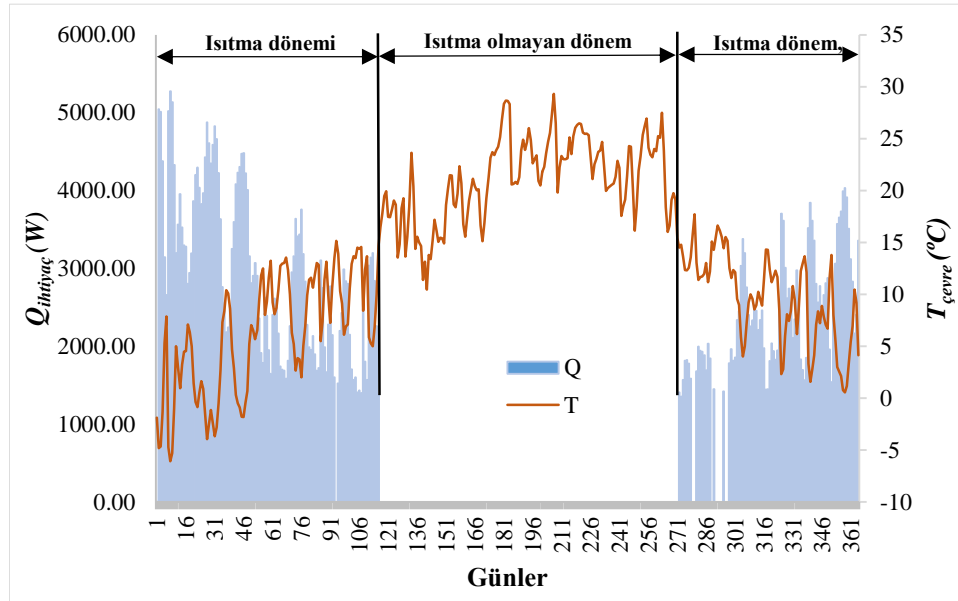
burada, U ve A bina yapılarının (pencere, zemin, tavan, duvar) ısı transfer katsayısı ve ısı transfer alanı olarak tanımlanırken, ΔT , iç ve dış ortam arasındaki sıcaklık farkıdır. U değerleri Türk Standartları Enstitüsü (TS825, 2008) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Buna göre, bina yapılarının U ve A değerleri için Tablo 3.10’da verilen değerler kabul edilmiştir. Bu varsayımlara göre, konutların ısı ihtiyacı hesaplanmış ve günlük ortalama ortam sıcaklığının 15 °C’nin altında olması durumunda ısıtma işleminin başlayacağı varsayılmıştır. Konut ısıtması için suyun giriş ve çıkış sıcaklıkları sırasıyla 50 °C ve 60 °C olarak kabul edilmiştir (Hu ve ark., 2024).

Tablo 3.10. Bina yapılarının ısı transfer katsayısı ve ısı transfer alanı

Yapılar	U (W/m ² K)	A^* (m ²)
Duvar	0,5	100
Zemin	2,4	120
Pencere	0,45	20
Tavan	0,3	120

*Bir konut için kabul edilen değerlerdir.

Günlük ortam sıcaklıkları için Meteoroloji Genel Müdürlüğünden (MGM, 2025) elde edilen veriler kullanılmıştır. Bir konutun günlük ortalama ortam sıcaklıkları ve günlük ısı ihtiyacındaki değişim Şekil 3.6’da verilmiştir. En soğuk günün (-8 °C) çevresek koşulları dikkate alındığında, bir konut için gerekli ısı ihtiyacı 5,3 kW olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.6. Günlük çevre sıcaklığı ve konuların ısı ihtiyacının değişimi

Konutların sıcak su ihtiyacı, il şebeke suyundan sağlanan ısıtma ile karşılanabilir. Bu nedenle şebeke suyu giriş sıcaklığı 10 olarak kabul edilmiştir ve kanutlarda kullanılan sıcak su

sıcaklığı 50 olarak belirlenmiştir (Zendejboudi, 2024; Hu vd., 2024). Bu çalışmada bir konutta dört kişinin yazdığı varsayılmıştır. Buna göre bir konutun günlük sıcak su ihtiyacı 150 litre/gün olarak belirlenmiştir (Boz ve Mutlu, 2013).

3.9. Termodinamik Analiz

Tasarlanan sistemlerin enerji ve ekserji analizine ilişkin temel denklemler bu bölümde verilmiştir. Enerji analizi sistemin birim zamanda gerçekleştirdiği enerji dönüşümlerini belirleyerek çevrimin genel performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Ancak enerji miktar olarak korunmakla birlikte kalite açısından değişime uğradığından, sistemin gerçek verimliliğini ortaya koymak için ekserji analiz de yapılmıştır.

Sabit akışlı bir açık sistemde kütle korunumu aşağıdaki denklemde verildiği gibi ifade edilir (Çengel vd., 2011);

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\zeta \quad (\text{D.107})$$

burada \dot{m} kütleli debidir. g ve ζ alt indisleri giriş ve çıkışı ifade eder. Sürekli akışlı bir sistemde enerji aktarımı ısı, iş ve kütle giriş çıkışı ile gerçekleşir. Buna göre genel enerji denklemi aşağıda verilen denklem ile ifade edilir (Çengel vd., 2011);

$$\dot{Q} + \dot{W} + \sum \dot{m}_g h_g - \sum \dot{m}_\zeta h_\zeta = 0 \quad (\text{D.108})$$

burada \dot{Q} ve \dot{W} sırasıyla ısı transfer oranı ve güçtür. h ise entalpi olarak tanımlanır. Yanmanın enerji dengesi aşağıdaki denklem ile verilir (Çengel vd., 2011);

$$\dot{Q}_f = \sum_g \dot{n}(\bar{h}_0^f + \bar{h}_T - \bar{h}_{298}) - \sum_\zeta \dot{n}(\bar{h}_0^f + \bar{h}_T - \bar{h}_{298}) \quad (\text{D.109})$$

burada \dot{Q}_f , yakıtın ısıdır. \dot{n} , \bar{h}_0^f , \bar{h}_T ve \bar{h}_{298} sırasıyla mol oranı, oluşum entalpisi, T sıcaklığındaki entalpi ve 298K'deki entalpidir. Genel ekserji denklemi aşağıda verilen denklem ile ifade edilir (Çengel vd., 2011);

$$\dot{E}x_Q - \dot{E}x_W + \sum \dot{m}_g \psi_g - \sum \dot{m}_\zeta \psi_\zeta - \dot{E}x_d = 0 \quad (\text{D.110})$$

burada $\dot{E}x_Q$, $\dot{E}x_W$ ve $\dot{E}x_d$ sırasıyla ısı ekserjisini, işin ekserjisini ve ekserji yıkımını ifade eder. ψ ise ekserji akısıdır. Bu ifadeler ayrıntılı olarak aşağıdaki denklemler ile verilir (Çengel vd., 2011);

$$\dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \quad (\text{D.111})$$

$$\dot{E}x_W = \dot{W} \quad (\text{D.112})$$

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (D.113)$$

burada s , entropi olarak tanımlanır. 0 alt indisi ise 25 °C ve 1atm'deki referasn durum koşullarını ifade eder. Güneş radyasyonunun ekserjisi aşağıdaki denklem ile verilir (Kalogirou, 2013);

$$\dot{E}x_{solar} = I_{DNI} \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}} \right) \right] \quad (D.114)$$

burada T_{sun} , güneşin sıcaklığıdır ve bu çalışmada 5800 K olarak alınmıştır (Tempesti vd., 2012). Yanmanın ekserji dengesi ise aşağıdaki denklem ile verilir (Uçar ve Arslan, 2021; Arslan ve Erbaş, 2021);

$$\dot{E}x_f = \left(1 - \frac{T_0}{T_{CC}} \right) - I \quad (D.115)$$

$$I = T_0 S_{\ddot{u}} \quad (D.116)$$

burada $S_{\ddot{u}}$ entropi üretimini ifade eder ve aşağıda verilen denklem ile belirlenir (Çengel vd., 2011);

$$S_{\ddot{u}} = S_{\zeta} - S_g + \frac{\dot{Q}_f}{T_{CC}} \quad (D.117)$$

burada T_{CC} , yanma odası sıcaklığını ifade eder. S aşağıda verildiği gibi hesaplanır (Çengel vd., 2011);

$$S = \sum \dot{n} (\bar{s}^o(T, P_0) - R_u \ln(y_i P)) \quad (D.118)$$

burada \bar{s}^o , R_u ve y_i sırasıyla molar entropi, evrensel gaz sabiti (8,314 kJ/kmolK) ve mol kesridir. Tasarlanan sistemlerde multijenerasyon çevrimi tüm sistemlerin birleşimini oluşturmaktadır bundan dolayı enerji ve ekserji dengesi denklemlerinde bu sistemin nokta değerleri kullanılmıştır. Tasarlanan multijenerasyon sisteminde PEM ünitesi bulunmadığından dolayı PEM'in entegre edildiği sistem bileşenleri ayrıca tabloya eklenmiştir. Buna göre sistemin her bir bileşenine ait enerji ve ekserji denklemleri Tablo 3.11'da verilmiştir.

Tablo 3.11. Tüm sistem bileşenlerinin enerji ve ekserji denge denklemleri

Bileşen	Enerji denge denklemleri	Ekserji denge denklemleri
PTSC	$\dot{m}_{11}h_{11} + \dot{W}_{takitip} + \dot{Q}_u = \dot{m}_{12}h_{12}$	$\dot{m}_{11}\psi_{11} + \dot{W}_{takitip} + \dot{E}x_{solar} = -\dot{m}_{12}\psi_{12} + \dot{E}x_{d,PTSC}$
HST	$\dot{m}_{14}h_{14} = \dot{m}_{15}h_{15} + \dot{Q}_{l,HST}$	$\dot{m}_{14}\psi_{14} = \dot{m}_{15}\psi_{15} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{14}}\right) \cdot \dot{Q}_{l,HST} + \dot{E}x_{d,HST}$
CST	$\dot{m}_{17}h_{17} + \dot{W}_{P-IV} = \dot{m}_{18}h_{18} + \dot{Q}_{l,CST}$	$\dot{m}_{17}\psi_{17} + \dot{W}_{P-IV} = \dot{m}_{18}\psi_{18} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{17}}\right) \cdot \dot{Q}_{l,CST} + \dot{E}x_{d,CST}$
HE-I	$\dot{m}_{12}h_{12} + \dot{m}_{18}h_{18} = \dot{m}_{13}h_{13} + \dot{m}_{14}h_{14}$	$\dot{m}_{12}\psi_{12} + \dot{m}_{18}\psi_{18} = \dot{m}_{13}\psi_{13} + \dot{m}_{14}\psi_{14} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{12}}\right) \cdot \dot{Q}_{HE-I} + \dot{E}x_{d,HE-I}$
HE-II	$\dot{m}_{16}h_{16} + \dot{m}_{2'}h_{2'} = \dot{m}_{17}h_{17} + \dot{m}_{3'}h_{3'}$	$\dot{m}_{16}\psi_{16} + \dot{m}_{2'}\psi_{2'} = \dot{m}_{17}\psi_{17} + \dot{m}_{3'}\psi_{3'} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{16}}\right) \cdot \dot{Q}_{HE-II} + \dot{E}x_{d,HE-II}$
HE-III	$\dot{m}_{12'}h_{12'} + \dot{m}_2h_2 = \dot{m}_{13'}h_{13'} + \dot{m}_3h_3$	$\dot{m}_{12'}\psi_{12'} + \dot{m}_2\psi_2 = \dot{m}_{13'}\psi_{13'} + \dot{m}_3\psi_3 + \left(1 - \frac{T_0}{T_{12'}}\right) \cdot \dot{Q}_{HE-III} + \dot{E}x_{d,HE-III}$
HE-IV	$\dot{m}_4h_4 + \dot{m}_6h_6 = \dot{m}_1h_1 + \dot{m}_7h_7$	$\dot{m}_4\psi_4 + \dot{m}_6\psi_6 = \dot{m}_1\psi_1 + \dot{m}_7\psi_7 + \left(1 - \frac{T_0}{T_4}\right) \cdot \dot{Q}_{HE-IV} + \dot{E}x_{d,HE-IV}$
HE-V	$\dot{m}_{22}h_{22} + \dot{m}_{29}h_{29} = \dot{m}_{23}h_{23} + \dot{m}_{30}h_{30}$	$\dot{m}_{22}\psi_{22} + \dot{m}_{29}\psi_{29} = \dot{m}_{23}\psi_{23} + \dot{m}_{30}\psi_{30} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{22}}\right) \cdot \dot{Q}_{HE-V} + \dot{E}x_{d,HE-V}$
HE-VI	$\dot{m}_{24}h_{24} + \dot{m}_{27}h_{27} = \dot{m}_{25}h_{25} + \dot{m}_{28}h_{28}$	$\dot{m}_{24}\psi_{24} + \dot{m}_{27}\psi_{27} = \dot{m}_{25}\psi_{25} + \dot{m}_{28}\psi_{28} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{24}}\right) \cdot \dot{Q}_{HE-VI} + \dot{E}x_{d,HE-VI}$
HE-VII	$\dot{m}_{25}h_{25} + \dot{m}_{36}h_{36} = \dot{m}_{26}h_{26} + \dot{m}_{37}h_{37}$	$\dot{m}_{25}\psi_{25} + \dot{m}_{36}\psi_{36} = \dot{m}_{26}\psi_{26} + \dot{m}_{37}\psi_{37} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{25}}\right) \cdot \dot{Q}_{HE-VII} + \dot{E}x_{d,HE-VII}$
Kondenser	$\dot{m}_8h_8 + \dot{m}_9h_9 = \dot{m}_5h_5 + \dot{m}_{10}h_{10}$	$\dot{m}_8h_8 + \dot{m}_9h_9 = \dot{m}_5h_5 + \dot{m}_{10}h_{10} + \left(1 - \frac{T_0}{T_8}\right) \cdot \dot{Q}_{con} + \dot{E}x_{d,con}$

Tablo 3.11. (Devamı)

Bileşen	Enerji denge denklemleri	Ekserji denge denklemleri
P-I	$\dot{m}_1 h_1 + \dot{W}_{P-I} = \dot{m}_2 h_2$	$\dot{m}_1 \psi_1 + \dot{W}_{P-I} = \dot{m}_2 \psi_2 + \dot{E}x_{d,P-I}$
P-II	$\dot{m}_5 h_5 + \dot{W}_{P-II} = \dot{m}_6 h_6$	$\dot{m}_5 \psi_5 + \dot{W}_{P-II} = \dot{m}_6 \psi_6 + \dot{E}x_{d,P-II}$
P-III	$\dot{m}_{13} h_{13} + \dot{W}_{P-III} = \dot{m}_{11} h_{11}$	$\dot{m}_{13} \psi_{13} + \dot{W}_{P-III} = \dot{m}_{11} \psi_{11} + \dot{E}x_{d,P-III}$
P-IV	$\dot{m}_{17} h_{17} + \dot{W}_{P-IV} = \dot{m}_{18} h_{18}$	$\dot{m}_{17} \psi_{17} + \dot{W}_{P-IV} = \dot{m}_{18} \psi_{18} + \dot{E}x_{d,P-IV}$
P-V	$\dot{m}_{15} h_{15} + \dot{W}_{P-V} = \dot{m}_{16} h_{16}$	$\dot{m}_{15} \psi_{15} + \dot{W}_{P-V} = \dot{m}_{16} \psi_{16} + \dot{E}x_{d,P-V}$
P-VI	$\dot{m}_{35} h_{35} + \dot{W}_{P-VI} = \dot{m}_{36} h_{36}$	$\dot{m}_{35} \psi_{35} + \dot{W}_{P-VI} = \dot{m}_{36} \psi_{36} + \dot{E}x_{d,P-VI}$
T-I	$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{W}_{T-I}$	$\dot{m}_3 \psi_3 = \dot{m}_4 \psi_4 + \dot{W}_{T-I} + \dot{E}x_{d,T-I}$
T-II	$\dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_8 h_8 + \dot{W}_{T-II}$	$\dot{m}_7 \psi_7 = \dot{m}_8 \psi_8 + \dot{W}_{T-II} + \dot{E}x_{d,T-II}$
AC	$\dot{m}_{19} h_{19} + \dot{W}_{AC} = \dot{m}_{20} h_{20}$	$\dot{m}_{19} \psi_{19} + \dot{W}_{AC} = \dot{m}_{20} \psi_{20} + \dot{E}x_{d,AC}$
CC	$\dot{m}_{20} h_{20} + \dot{m}_{21} h_{21} + \dot{m}_{31} h_{31} = \dot{Q}_{cc} + \dot{m}_{22} h_{22}$	$\dot{m}_{20} \psi_{20} + \dot{m}_{21} \psi_{21} + \dot{m}_{31} \psi_{31} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{22}}\right) \cdot \dot{Q}_{cc} + \dot{m}_{22} \psi_{22} + \dot{E}x_{d,cc}$
GT	$\dot{m}_{23} h_{23} = \dot{m}_{24} h_{24} + \dot{W}_{GT}$	$\dot{m}_{23} \psi_{23} = \dot{m}_{24} \psi_{24} + \dot{W}_{GT} + \dot{E}x_{d,GE}$
SOEC	$\dot{m}_{30} h_{30} + \dot{W}_{SOEC} = \dot{m}_{31} h_{31} + \dot{m}_{32} h_{32} + \dot{Q}_{SOEC}$	$\dot{m}_{30} \psi_{30} + \dot{W}_{SOEC} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{30}}\right) \cdot \dot{Q}_{SOEC} + \dot{m}_{31} \psi_{31} + \dot{m}_{32} \psi_{32} + \dot{E}x_{d,SOEC}$
Ayrıştırıcı	$\dot{m}_{32} h_{32} = \dot{m}_{33} h_{33} + \dot{m}_{34} h_{34}$	$\dot{m}_{32} \psi_{32} = \dot{m}_{33} \psi_{33} + \dot{m}_{34} \psi_{34} + \dot{E}x_{d,S}$
Karıştırıcı	$\dot{m}_{34} h_{34} + \dot{m}_{28} h_{28} = \dot{m}_{29} h_{29}$	$\dot{m}_{34} \psi_{34} + \dot{m}_{28} \psi_{28} = \dot{m}_{29} \psi_{29} + \dot{E}x_{d,M}$
PEM*	$\dot{m}_{12} h_{12} + \dot{W}_{PEM} = \dot{m}_{13} h_{13} + \dot{m}_{14} h_{14}$	$\dot{m}_{12} \psi_{12} + \dot{W}_{PEM} = \dot{m}_{13} \psi_{13} + \dot{m}_{14} \psi_{14} + \dot{E}x_{d,PEM}$
S*	$\dot{m}_{14} h_{14} = \dot{m}_{15} h_{15} + \dot{m}_{16} h_{16}$	$\dot{m}_{14} \psi_{14} = \dot{m}_{15} \psi_{15} + \dot{m}_{16} \psi_{16} + \dot{E}x_{d,S}$

*PEM tabanlı multijenerasyon sistemi bileşenleri

3.10. Ekonomik Analiz

Sistemlerin ekonomik olarak uygulanabilirliğini değerlendirmek için Net Bugünkü Değer (NBD) metodu kullanılmıştır. NBD metodu, projenin ömrü boyunca elde edilen yıllık gelirler ile yapılan harcamaları belirli iskonto oranı kullanılarak bugünkü değerine indirir. Bu metod, yatırımın karlılığının ve geri ödeme potansiyelinin değerlendirilmesine olanak tanır. Pozitif bir NBD, projenin yatırıma uygun olduğunu, negatif NBD ise projenin yatırıma uygun olmadığını gösterir. NBD'nin genel denklemi aşağıda verildiği gibidir;

$$NBD = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} \quad (D.119)$$

burada n , r ve B_t , sırasıyla sistemin ömrü (20 yıl), iskonto oranı (%13) ve t yılındaki nakit akışıdır. B_t aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$B_t = C_e - C_{bo} - C_p \text{ (Güneş enerjisi destekli iki kademeli sistem için)} \quad (D.120)$$

$$B_t = C_e + C_{H_2} + C_{O_2} + C_b + C_{isl} - C_{bo} - C_p \text{ (Multijenerasyon sistemi için)} \quad (D.121)$$

burada C_e , elektrik kazancı, C_{H_2} hidrojen kazancı, C_{O_2} , oksijen kazan C_b , biyokütle bertaraf kazancı, C_{isl} , ısı kazancıdır. C_{bo} ve C_p ise bakım onarım maliyeti ve yıllık personel giderleridir. Tasarlanan sistemin maliyet analizi ilk yatırım maliyeti (C_i), yatırım maliyeti (C_y) ve hurda maliyetini (C_h) içerir. Buna göre C_i aşağıda verilen denklem ile belirlenir;

$$C_i = C_y - C_h \quad (D.122)$$

Bu çalışmada hurda maliyeti, yatırım maliyetinin %10'unu olarak kabul edilmiştir. Sistemin yatırım maliyeti güneş enerjili iki kademeli sistem için aşağıda verildiği gibidir;

$$C_y = C_{GA} + C_{TED} + C_{GB} \quad (D.123)$$

burada C_{GA} , C_{TED} ve C_{GB} sırasıyla güneş alanı maliyeti, termal enerji depolama ünitesi maliyeti ve güç bloğu maliyetidir. C_{GA} ve C_{TED} sırasıyla 150 \$/m² (Turchi vd., 2019) ve 25,68 \$ (Reddy, 2013). C_{GB} , türbin, ısı değiştirici ve pompa gibi ekipmanların maliyetini içerir. Multijenerasyon sisteminin yatırım maliyeti ise aşağıda verilen denklem ile belirlenir;

$$C_y = C_{GA} + C_{TED} + C_{GB} + C_{\text{ÇA}} + C_{brayton} + C_{SOEC} \quad (D.124)$$

burada $C_{\text{ÇA}}$, $C_{brayton}$ ve C_{SOEC} sırasıyla biyokütle çürütme alanı maliyeti, brayton çevrimi maliyeti ve SOEC ünitesinin maliyetidir. $C_{brayton}$, hava kompresörü, yanma odası, gaz türbini ve ısı değiştiricileri gibi ekipmanların maliyetlerinin toplamıdır. Tüm sistem ekipmanlarının

maliyeti (C_e), Kimya Mühendisliği Tesis Maliyet İndeksi (CEPCI) kullanılarak ve 2024 yılı referans alınarak belirlenmiştir C_e aşağıda verilen denklem ile hesaplanabilir (Turton vd., 2008);

$$C_e = \frac{CEPCI_{2024}}{CEPCI_{2001}} \cdot F_{BM,i} \cdot C_{0,i} \quad (D.125)$$

burada, 2001 ve 2024 yılındaki CEPCI değerleri sırasıyla 394.3 (Turton vd., 2008) ve 789.8 (Maliyet indeksi, 2025) dir. $F_{BM,i}$ ve $C_{0,i}$ sırasıyla ekipmanın çıplak modül maliyet faktörü ve ekipman satın alma maliyeti olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi hesaplanır (Turton vd., 2008);

$$F_{BM,i} = [B_{1,i} + (B_{2,i} \cdot F_{M,i} \cdot F_{P,i})] \quad (D.126)$$

$$\log F_{P,i} = [c_{1,i} + c_{2,i}(\log E_i) + c_{3,i}(\log E_i)^2] \quad (D.127)$$

$$\log C_{0,i} = [K_{1,i} + K_{2,i}(\log E_i) + K_{3,i}(\log E_i)^2] \quad (D.128)$$

burada, $F_{M,i}$, $F_{P,i}$ ve E_i sırasıyla, malzeme faktörü, basınç faktörü ve ekipman faktörüdür. $B_{1,i}$, $B_{2,i}$, $K_{1,i}$, $K_{2,i}$, $K_{3,i}$, $c_{1,i}$, $c_{2,i}$, ve $c_{3,i}$ her bir ekipmanda kullanılan malzemeye ait sabitlerdir ve değerleri Tablo 3.12’de verilmiştir.

Tablo 3.12. Ekipman maliyeti için sabit değerler (Turton vd., 2008)

Sabitler	Ekipman							
	Gövde borulu ısı değiştirici	Plakalı ısı değiştirici	Türbin	Gaz Türbini	Hava kompresörü	Yanma odası	Ayrıştırıcı	Pompa
K_1	4,27	4,66	2,62	-21,77	2,28	6,96	3,49	3,38
K_2	-0,04	-0,15	1,43	13,21	1,36	-1,48	0,44	0,05
K_3	0,14	0,15	-0,17	-1,52	-0,10	0,31	0,10	0,15
B_1	1,63	0,96	-	-	-	-	2,25	1,89
B_2	1,66	1,21	-	-	-	-	1,82	1,35
c_1	0	0	0	0	0	0	3,2	-0,39
c_2	0	0	0	0	0	0	0	0,39
c_3	0	0	0	0	0	0	0	-0,002
F_M	2,73	2,45	-	-	-	-	0	2,2
F_P	1	1	-	1	1	1	1	-
F_{BM}	-	-	11,6	11,6	1,2	1,25	8,07	-

Tesisin personel giderleri belirlenirken bir mühendis ve on işçi çalıştığı kabul edilmiş olup 2025 yılı asgari ücreti 544,99 \$ olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Buna göre C_p , aşağıda verildiği gibi hesaplanır;

$$C_p = 544,99 \cdot 12 \cdot (2,1 \cdot 1 + 1,2 \cdot 10) \quad (D.129)$$

Elektriğin birim maliyeti 0,133 \$ olarak kabul edilmiştir (ETKB, 2022). Buna göre C_e aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir;

$$C_e = \dot{W}_{net} \cdot 0,133 \quad (D.130)$$

Hidrojen ve oksijenin birim maliyeti sırasıyla 6,26 \$/kg (Imarc, 2025) ve 21,3 \$/kg (Oxygen price, 2025) olarak kabul edilmiştir. Buna göre C_{H_2} ve C_{O_2} aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir;

$$C_{H_2} = H_2 \cdot 6,26 \quad (D.131)$$

$$C_{O_2} = O_2 \cdot 21,3 \quad (D.132)$$

Biyokütlenin ton başına bertaraf ücreti 8,42 \$ (ÇŞB, 2025)'dir. Buna göre C_b aşağıda verilen denklem ile hesaplanabilir;

$$C_d = M_{bio} \cdot 8,42 \quad (D.133)$$

burada M_{bio} , yıllık biyokütle miktarıdır. Isı kazancı hesaplanırken, konutların ısınma ve sıcak su ihtiyacı TED'de depolanan ısı yerine doğalgazla karşılanması durumunda oluşacak maliyet dikkate alınmış ve bu sonuç sistemin ısı kazancı olarak değerlendirilmiştir. Buna göre doğalgaz tüketimi ($V_{doğalgaz}$) ($m^3/yıl$) ve maliyeti ($C_{ısı}$) aşağıda verildiği hesaplanabilir;

$$V_{doğalgaz} = \frac{Q_{ısı}}{\eta_{kombi} \cdot LHV_{doğalgaz}} \quad (D.134)$$

$$C_{ısı} = V_{doğalgaz} \cdot 0,25 \quad (D.135)$$

Burada η_{kombi} , kombi verimidir ve %85 olarak kabul edilmiştir (Vaillant, 2025). $LHV_{doğalgaz}$, doğalgazın alt ısı değeridir ve literatürdeki çalışmalar baz alınarak 38 MJ/m³ (Bai vd., 2024) olarak kabul edilmiştir. Doğalgazın birim maliyeti ise 0,25 \$/m³ olarak alınmıştır (Aksa Doğalgaz, 2025).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

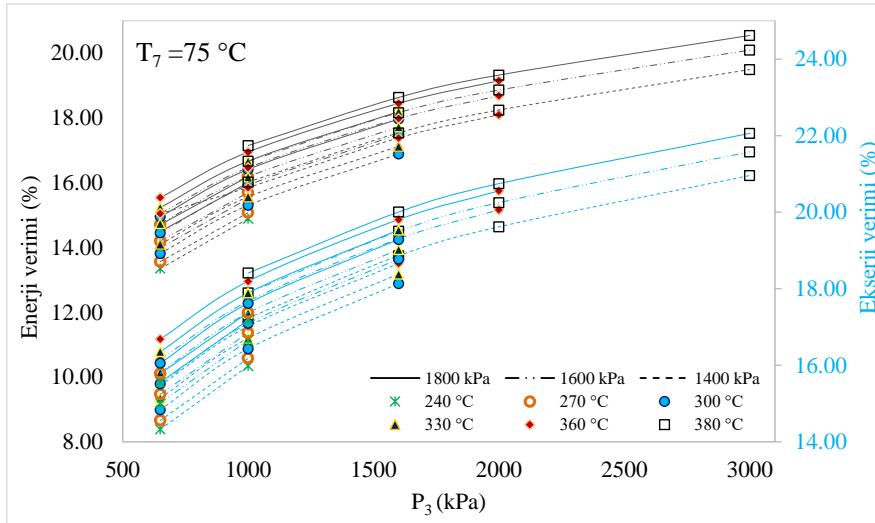
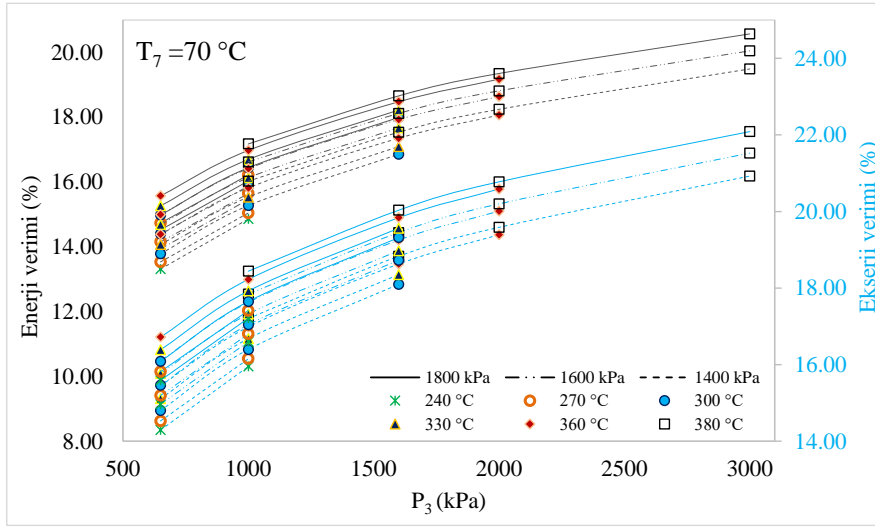
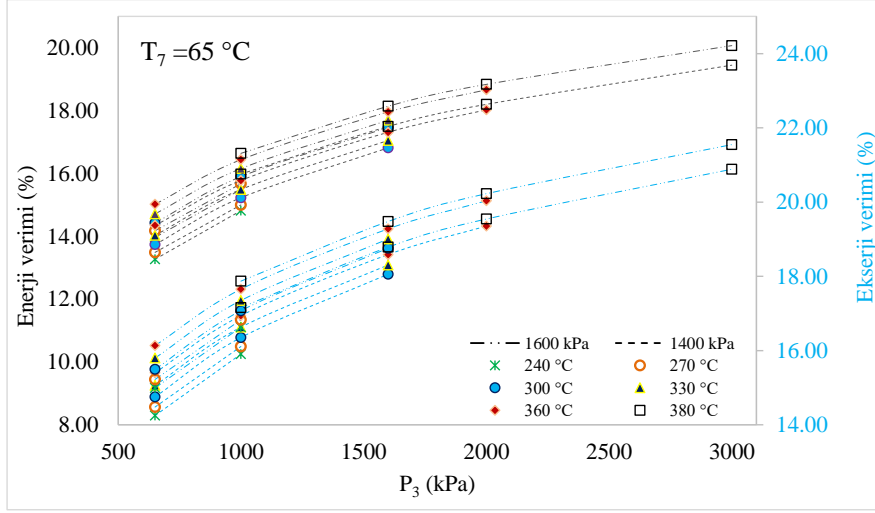
4.1. Güneş Enerjisi Destekli İki Kademeli Güç Çevrimi

Tasarlanan güneş enerjisi destekli iki kademeli güç çevrimi sistemi, GA, TED sistemi, SRC ve ORC'den oluşmaktadır. ORC'de iki farklı soğutucu akışkan (R152a, R600a) kullanılarak tasarlanan sistem termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarına göre analiz edilmiş ve NBD yöntemi kullanılarak maliyet analizi yapılmıştır. En uygun çalışma koşullarını belirlemek için saatlik bazda dinamik bir model geliştirilmiştir. Türbin giriş sıcaklığına ve basıncına göre çeşitli parametre değerlerinde analiz edilen sistemin enerji verimi, ekserji verimi, net güç üretimi ve maliyet analizi sonuçları grafiklerde verilmiştir.

GA ve TED için sabit kabul edilen parametre değerleri şu şekildedir; $T_{11}=120$ °C, $T_{12}=400$ °C, $T_{14}=390$ °C ve $T_{18}=111$ °C. GA ve TED için daha önceki çalışmada parametrik değerlendirme yapılmış ve bu değerler en uygun çalışma parametreleri olarak belirlenmiştir (Arslan ve Kılıç, 2021). Sistemin parametrik analizi SRC ve ORC'de türbin giriş sıcaklığı ve basıncına bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. SRC için parametre değerleri şu şekildedir; $T_3=240-380$ °C ve $P_3=650-3000$ kPa. ORC için R152a kullanılan tasarımda parametre değerleri; $T_7=65-75$ °C ve $P_7=1400-1800$ kPa, R600a kullanılan tasarımda parametre değerleri ise; $T_7=70-75$ C ve $P_7=900-1100$ kPa'dır. Tasarım parametreleri belirlenirken, türbin çıkışında akışkanın aşırı yoğuşmasını önlemek amacıyla kuruluk derecesi ideal kabul edilen 0,85-1 aralığında tutulmuştur. Kuruluk derecesinin 0,85'in altına düşmesi, buhar içerisindeki sıvı damlacığı oranının artmasına yol açmakta; bu durum türbin kanatlarında korozyon riskini arttırarak ekipman ömrünü azaltmaktadır. Bundan dolayı türbin çıkış koşullarının belirlenmesinde kuruluk derecesinin söz konusu alt sınırın üzerinde kalmasına dikkat edilmiştir.

Sistem tasarımında maliyet analizi, kurulu güce göre hesaplanmıştır. Kurulu güç, maksimum güneş radyasyonunun elde edildiği zaman dilimini temsil etmekte olup, tasarlanan sistem için 1 Temmuz günü öğlen saatlerinde elde edilen 541 W/m^2 DNI değeri tasarım noktası olarak kabul edilmiştir. Kolektörlerden elde edilen ısının bir kısmı güç çevrimine aktarılırken geri kalan kısmı TED sisteminde depolanmak için ayrılır. Gündüz ve gece kullanımında maksimum faydayı sağlamak için bu x kütle oranı 0,34 olarak kabul edilmiştir.(Arslan ve Kılıç, 2021).

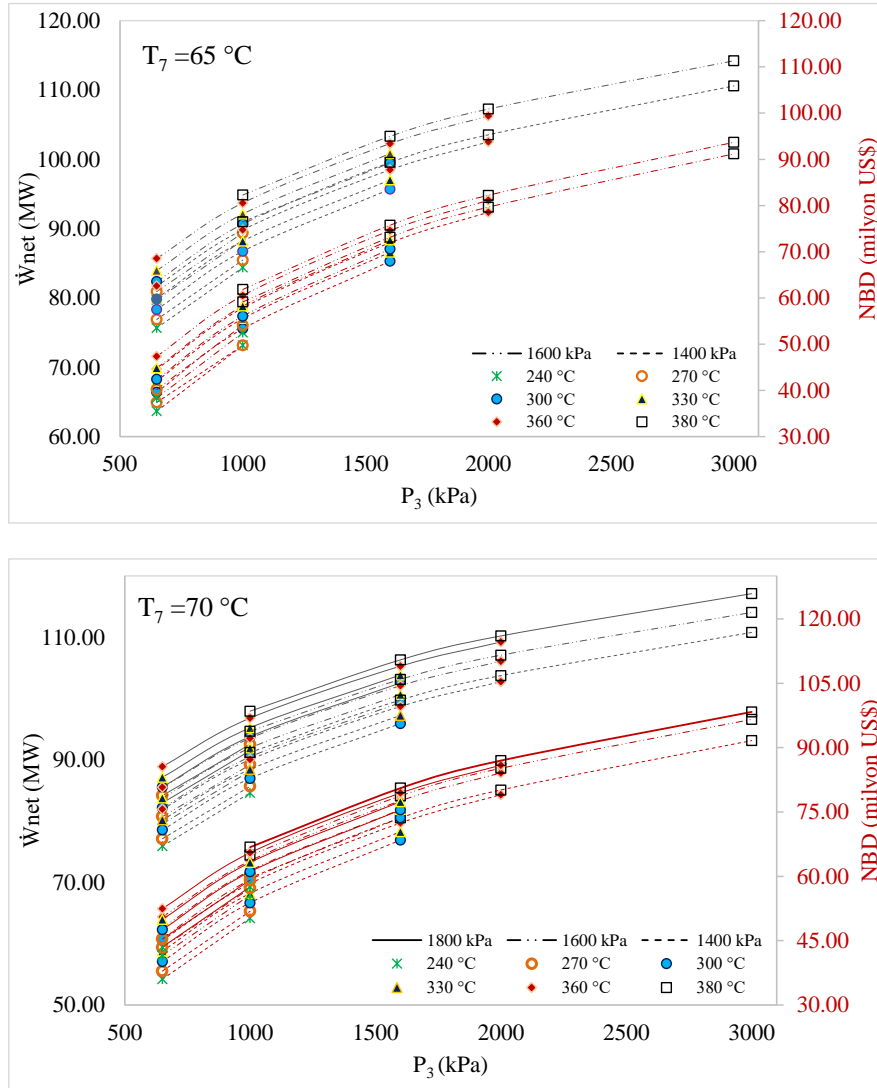
R152a soğutucu akışkanının kullanıldığı sistemde parametrik değerlendirme sonucu elde edilen enerji verimi (η) ve ekserji verimi (ϵ) sonuçları Şekil 4.1'de verilmiştir.

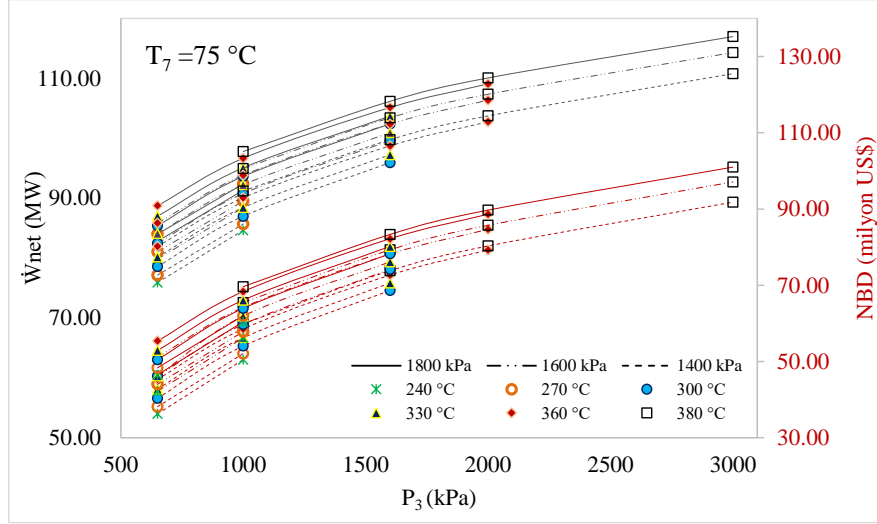


Şekil 4.1. R152a soğutucu akışkanın kullanıldığı sistemin η ve ε değişimi

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi hem SRC hem de ORC için basınç ve sıcaklık artışı, enerji ve ekserji verimlerini arttırmıştır. SRC’de en düşük η ve ε , T_3 sıcaklığının 240 °C ve P_3

basıncının 650 kPa olduğu çalışma koşullarında elde edilmiştir. Buna karşılık ORC’de 1400 kPa yoğuşturucu basıncında T_7 sıcaklığındaki değişime bağlı olarak η ve ε sırasıyla şu şekilde belirlenmiştir; $T_7=65^\circ\text{C}$ ise %13,30 ve %14,27, $T_7=70^\circ\text{C}$ ise %13,31 ve %14,25, $T_7=75^\circ\text{C}$ ise %13,35 ve %14,33. Çevrimin en yüksek η ve ε değerleri ise SRC’de T_3 sıcaklığını 380°C ve P_3 basıncının 3000 kPa olduğu çalışma koşullarında elde edilmiştir. ORC’de T_7 sıcaklığının 65°C olduğu durumda en uygun çalışma basıncı 1600 kPa olduğundan bu koşullarda en yüksek η ve ε sırasıyla %20,05 ve 21,55dir. ORC’de 1800 kPa yoğuşturucu basıncında T_7 sıcaklığının değişimine bağlı olarak η ve ε sırasıyla şu şekildedir; $T_7=70^\circ\text{C}$ ise %20,57 ve %22,09, $T_7=75^\circ\text{C}$ ise %20,55 ve %22,06. R152a soğutucu akışkanının kullanıldığı sistemde parametrik değerlendirme sonucu elde edilen net güç üretimi (\dot{W}_{net}) ve NBD analizi sonuçları Şekil 4.2’de verilmiştir.





Şekil 4.2. R152a soğutucu akışkanın kullanıldığı sistemin \dot{W}_{net} ve NBD değişimi

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi hem SRC hem de ORC için basınç ve sıcaklık artışı, net güç üretimini ve NBD’yi arttırmıştır. SRC’de en düşük \dot{W}_{net} ve NBD, T_3 sıcaklığının 240 °C ve P_3 basıncının 650 kPa olduğu çalışma koşullarında elde edilmiştir. Buna karşılık ORC’de 1400 kPa yoğuşturucu basıncında T_7 sıcaklığındaki değişime bağlı olarak \dot{W}_{net} ve NBD sırasıyla şu şekilde belirlenmiştir; $T_7= 65$ °C ise 75,66 MW ve 35,5 milyon US\$, $T_7= 70$ °C ise 75,91 MW ve 36 milyon US\$, $T_7=75$ °C ise 76,10 MW ve 36,25 US\$. Çevrimin en yüksek \dot{W}_{net} ve NBD değerleri ise SRC’de T_3 sıcaklığını 380 °C ve P_3 basıncının 3000 kPa olduğu çalışma koşullarında elde edilmiştir. ORC’de T_7 sıcaklığının 65 °C olduğu durumda en uygun çalışma basıncı 1600 kPa olduğundan bu koşullarda en yüksek \dot{W}_{net} ve NBD sırasıyla 114,20 MW ve 93,65 milyon US\$’dir. ORC’de 1800 kPa yoğuşturucu basıncında T_7 sıcaklığının değişimine bağlı olarak \dot{W}_{net} ve NBD sırasıyla şu şekildedir; $T_7= 70$ °C ise 117,12 MW ve 98,31 milyon US\$, $T_7= 75$ °C ise 116,97 MW ve 100,99 milyon US\$.

Güneş enerjisi destekli iki kademeli güç çevriminde ORC’de R152a soğutucu akışkanının kullanıldığı sistem parametreleri değerlendirildiğinde hem termodinamik hem de ekonomik açıdan en uygun sistem parametreleri şu şekildedir; $T_3= 380$ °C, $P_3= 3000$ kPa, $T_7= 75$ °C ve $P_7= 1800$ kPa. Bu tasarım koşullarında sistemin enerji verimi, ekserji verimi, net güç üretimi ve NBD analizi sonuçları sırasıyla %20,55, %22,06, 116,97 MW ve 100,99 milyon US\$’dir. Bu tasarım için sistemin her bir noktasının güneşlenme zamanında ve güneş olmadığı zamandaki termodinamik özellikleri Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1. R152a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli güç çevrimi için güneşlenme zamanında her bir noktanın termodinamik özellikleri

Nokta	Akışkan	\dot{m} kg/s	T °C	P kPa	h kJ/kg	s kJ/kgK
1	R718	131,99	81,32	50	340,5	1,091
2	R718	131,99	81,35	3000	343,57	1,091
3	R718	131,99	380	3000	3185,87	6,8543
4	R718	131,99	81,32	50	2503,75	6,8543
5	R152a	993,6	40,03	910	271,41	1,2413
6	R152a	993,6	40,35	1800	272,44	1,2413
7	R152a	993,6	75	1800	554,05	2,0731
8	R152a	993,6	42,97	910	535,57	2,0731
9	Hava	25060,15	29,8	101,32	429,3	3,893
10	Hava	25060,15	45	101,32	444,57	3,944
11	Terminol VP-I	936,72	120	23	181,30	0,54
12	Terminol VP-I	318,5	400	23	800,50	1,71
13	Terminol VP-I	318,5	120	15	181,30	0,54
14	Eriyik tuz	417,3	390	–	483,06	–
18	Eriyik tuz	417,3	111	–	19,92	–

Tablo 4.2. R152a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli güç çevrimi için güneş olmadığı zamanda her bir noktanın termodinamik özellikleri

Nokta	Akışkan	\dot{m} kg/s	T °C	P kPa	h kJ/kg	s kJ/kgK
1	R718	40,56	81,32	50	340,5	1,091
2	R718	40,56	81,35	3000	343,57	1,091
3	R718	40,56	380	3000	3185,87	6,8543
4	R718	40,56	81,32	50	2503,75	6,8543
5	R152a	305,31	40,03	910	271,41	1,2413
6	R152a	305,31	40,35	1800	272,44	1,2413
7	R152a	305,31	75	1800	554,05	2,0731
8	R152a	305,31	42,97	910	535,57	2,0731
9	Hava	3907,65	19,9	101,32	419,3	3,859
10	Hava	3907,65	45	101,32	444,57	3,944
15	Eriyik tuz	257,27	388,22	–	480,11	–
16	Eriyik tuz	257,27	388,22	–	480,11	–
17	Eriyik tuz	257,27	112,79	–	22,90	–

R152a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli güç çevrimi sistemdeki her bir bileşenin enerji ve ekserji analizi sonuçları Tablo 4.3’de verilmiştir. Ayrıca NBD analizi sonuçları Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.3. R152a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli güç çevriminde sistemin herbir bileşeninin enerji ve ekserji analizi sonuçları

Bileşen	$\dot{E}_{kütle,g}$ kW	$\dot{E}_{kütle,ç}$ kW	\dot{Q} kW	\dot{W} kW	$\dot{E}x_{kütle,g}$ kW	$\dot{E}x_{kütle,ç}$ kW	$\dot{E}x_Q$ kW	$\dot{E}x_W$ kW	$\dot{E}x_d$ kW	η %	ϵ %
PTSC	169728,2	254946,9	643506,1	542,12	19288,19	92949,78	640475,6	542,12	567356,13	81	86
HE-I	197205,7	193261,5	3944,1	–	100180,1	93572,12	2197,19	–	8805,15	98	91
HE-II	117628,7*	115276,1*	2352,57*	–	12444,5*	51723,16*	1292,02*	–	74013,34*	98	81
HE-III	382810,98	375154,8	7656,22	–	183441	162698,5	4265,14	–	25007,61	98	85
HE-IV	285522,2	279811,8	5710,44	–	125381,6	100018,8	907,26	–	26270,11	98	79
	87734,15*	85979,47*	1754,68*	–	38526,77*	30733,37*	278,78*	–	8072,18*	98	79
P- I	44947,82	45348,84	–	501,27	2608,04	3009,05	–	501,27	100,25	99	97
	13811,3*	13934,6*	–	154,03*	801,39*	924,61*	–	154,03*	30,81*	99	97
P- II	269681,1	270709,9	–	1285,92	63018,99	64047,73	–	1285,92	257,18	99	99
	82866,56*	83182,67*	–	395,13*	19364,23*	19680,33*	–	395,13*	79,03*	99	99
P- III	55962,94	55962,94	–	9,24	13173,1	18693,4	–	9,24	588,94	99	95
T- I	420503,6	330470,1	–	76528,5	151367,4	61333,88	–	76528,5	13505,0	79	91
	129210,7*	101545,5*	–	23515,3*	46511,5*	18846,4*	–	23515,3*	4149,7*	78*	91*
T- II	550521,7	532154,5	–	15612,13	97410,72	79043,51	–	15612,13	2755,08	96	97
	169162,1*	163518,3*	–	4797,23*	29931,98*	24288,18*	–	4797,23*	846,57*	96	97
Kondenser	262473,3	257223,9	5249,46	501,20	107479,7	89561,07	298,41	501,20	18121,41	97	83
	80651,77*	79038,74*	1613,03*	78,15*	29008,93*	23502,96*	91,69*	78,15*	5492,42*	98	82
Tüm Sistem										20,55	22,06

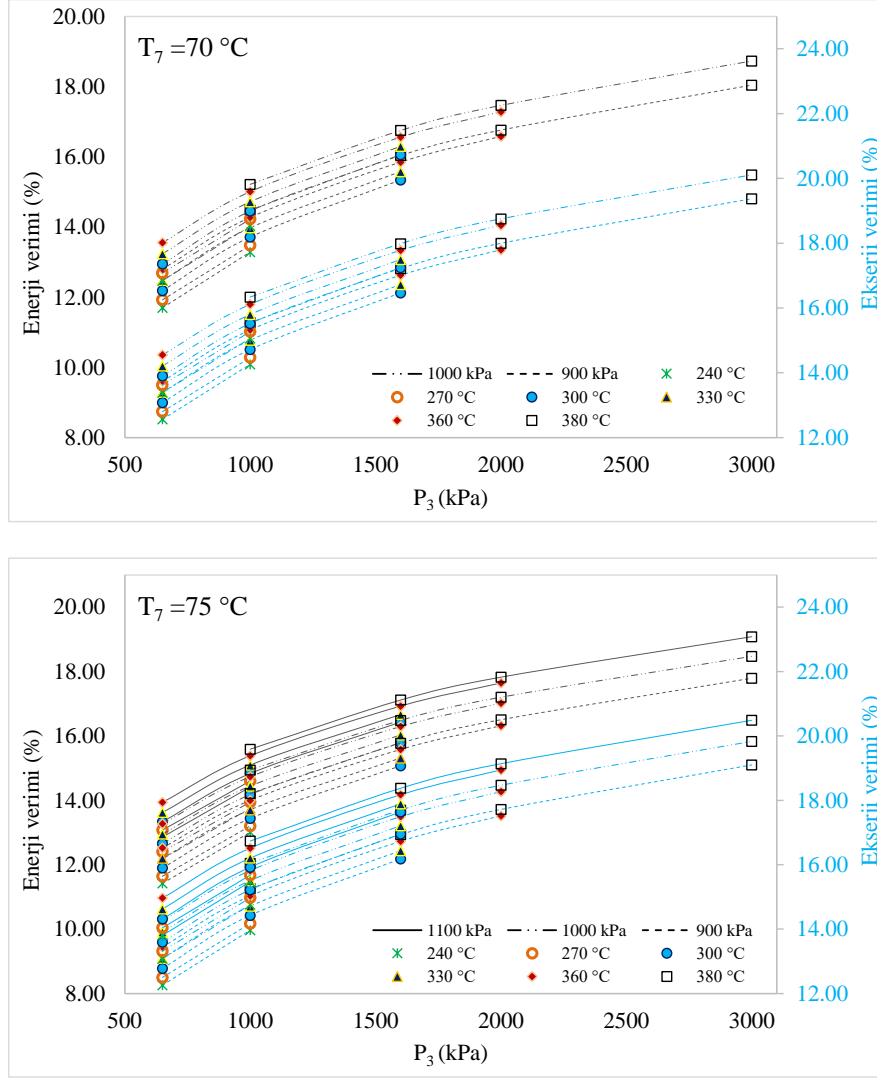
* güneş olmadığı zamanı tanımlar

Tablo 4.4. R152a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli güç çevriminin NBD analizi sonuçları

Yatırım	Bugün	5	10	15	20
GA maliyeti	-67.736.850,0				
TED maliyeti	-15.116.068,88				
GB maliyeti	-9.717.159,48				
Toplam maliyet	-92.570.078,36				
Hurda maliyeti	-9.257.007,84				
İlk yatırım maliyeti	-83.313.070,53				
Nakit Akışı (US\$)					
Bakım onarım maliyeti	-12.496.960,58	-624.848,03	-624.848,03	-624.848,03	-624.848,03
Personel giderleri	-92.789,01	-92.789,01	-92.789,01	-92.789,01	-92.789,01
Elektrik üretimi	22.366.618,7	22.366.618,7	22.366.618,7	22.366.618,7	22.366.618,7
Toplam nakit akışı	9.766.860,11	21.648.972,66	21.648.972,66	21.648.972,66	21.648.972,66
İskonto oranı	1	0.62	0.39	0.24	0.15
Bugünkü değer	-83.313.070,53	13.442.308,75	8.346.616,13	5.182.591,93	3.217.981,84
NBD (US\$)		100.996.837,67			

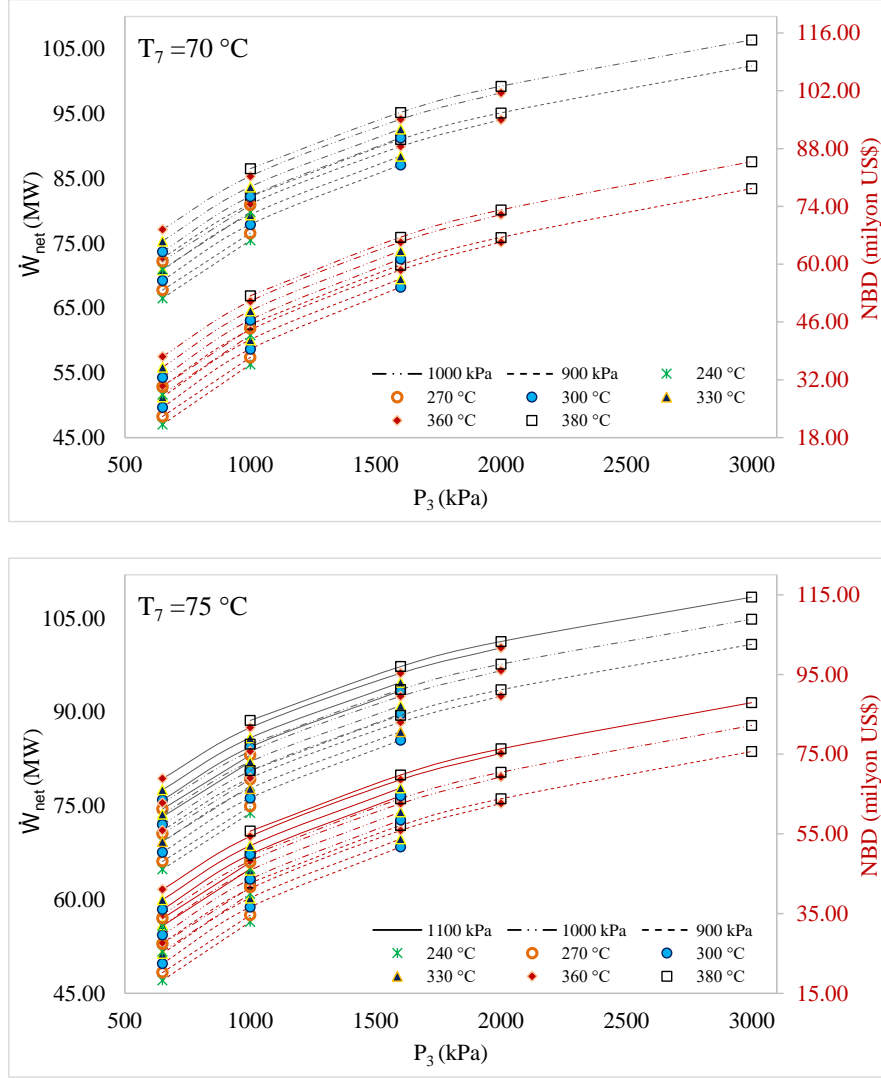
Tablo 4.4’de görüldüğü sistemin ilk yatırım maliyetinin büyük bir kısmını 67 milyon US\$ ile GA maliyeti oluşturmaktadır. Daha sonra bunu TED ünitesi maliyeti ve BG maliyeti takip etmektedir. Buna göre R152a soğutucu akışkanının kullanıldığı güneş enerjisi destekli iki kademeli güç çevriminin ilk yatırım maliyeti 83 milyon US\$ olarak belirlenmiştir. Maliyet analizi sonunda sistemin 4. yıldan sonra karlı hala geldiği ve 20 yıl sonunda 100,99 milyon US\$ kar sağlanabileceği belirlenmiştir.

R600a soğutucu akışkanının kullanıldığı sistemde parametrik değerlendirme sonucu elde edilen η ve ε sonuçları Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. R600a soğutucu akışkanın kullanıldığı sistemin η ve ε değişimi

Şekil 4.3’de görüldüğü gibi hem SRC hem de ORC için basınç ve sıcaklık artışı, enerji ve ekserji verimlerini arttırmıştır. SRC’de en düşük η ve ε , T_3 sıcaklığının 240 °C ve P_3 basıncının 650 kPa olduğu çalışma koşullarında elde edilmiştir. Buna karşılık ORC’de 900 kPa yoğusturucu basıncında T_7 sıcaklığındaki değişime bağlı olarak η ve ε sırasıyla şu şekilde belirlenmiştir; $T_7= 70$ °C ise %11,10 ve %12,56, $T_7= 75$ °C ise %11,42 ve %12,26. Çevrimin en yüksek η ve ε değerleri ise SRC’de T_3 sıcaklığını 380 °C ve P_3 basıncının 3000 kPa olduğu çalışma koşullarında, ORC’de ise 1000 kPa için 70 °C ve 1100 kPa için 75 °C’de elde edilmiştir. Buna göre en yüksek η ve ε sırasıyla $T_7 =70$ °C ve $P_7 =1000$ kPa için %18,73 ve %19,83, $T_7= 75$ °C ve $P_7= 1100$ kPa için %19,08 ve %20,49 olarak belirlenmiştir. R600a soğutucu akışkanının kullanıldığı sistemde parametrik değerlendirme sonucu elde edilen \dot{W}_{net} ve NBD analizi sonuçları Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4. R600a soğutucu akışkanın kullanıldığı sistemin \dot{W}_{net} ve NBD değişimi

Şekil 4.4’de görüldüğü gibi hem SRC hem de ORC için basınç ve sıcaklık artışı, net güç üretimini ve NBD’yi arttırmıştır. SRC’de en düşük \dot{W}_{net} ve NBD, T_3 sıcaklığının 240 °C ve P_3 basıncının 650 kPa olduğu çalışma koşullarında elde edilmiştir. Buna karşılık ORC’de 900 kPa yoğuşurucu basıncında T_7 sıcaklığındaki değişime bağlı olarak \dot{W}_{net} ve NBD sırasıyla şu şekilde belirlenmiştir; $T_7 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ise 66,51 MW ve 21,17 milyon US\$, $T_7 = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ ise 64,85 MW ve 18,26 milyon US\$. Çevrimin en yüksek \dot{W}_{net} ve NBD değerleri ise SRC’de T_3 sıcaklığını 380 °C ve P_3 basıncının 3000 kPa olduğu çalışma koşullarında, ORC’de ise 1000 kPa için 70 °C ve 1100 kPa için 75 °C’de elde edilmiştir. Buna göre en yüksek \dot{W}_{net} ve NBD sırasıyla $T_7 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $P_7 = 1000 \text{ kPa}$ için 106,38 MW ve 84,80 milyon US\$, $T_7 = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $P_7 = 1100 \text{ kPa}$ için 108,43 ve 87,92 milyon US\$ olarak belirlenmiştir.

Güneş enerjisi destekli iki kademeli güç çevriminde ORC’de R600a soğutucu akışkanının kullanıldığı sistem parametreleri değerlendirildiğinde hem termodinamik hem de

ekonomik açıdan en uygun sistem parametreleri şu şekildedir; $T_3= 380\text{ }^\circ\text{C}$, $P_3= 3000\text{ kPa}$, $T_7= 75\text{ }^\circ\text{C}$ ve $P_7= 1100\text{ kPa}$. Bu tasarım koşullarında sistemin enerji verimi, ekserji verimi, net güç üretimi ve NBD analizi sonucu sırasıyla %19,08, %20,49, 108,43 MW ve 87,92 milyon US\$'dır. Bu tasarım için sistemin her bir noktasının güneşlenme zamanında ve güneş olmadığı zamandaki termodinamik özellikleri Tablo 4.5 ve Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.5. R600a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli güç çevrimi için güneşlenme zamanında her bir noktanın termodinamik özellikleri

Nokta	Akışkan	\dot{m} kg/s	T °C	P kPa	h kJ/kg	s kJ/kgK
1	R718	131,99	81,32	50	340,5	1,091
2	R718	131,99	81,35	3000	343,57	1,091
3	R718	131,99	380	3000	3185,87	6,8543
4	R718	131,99	81,32	50	2503,75	6,8543
5	R600a	786,5	41,33	550	299,66	1,3369
6	R600a	786,5	41,54	1100	300,69	1,3369
7	R600a	786,5	75	1100	656,45	2,3817
8	R600a	786,5	43,85	550	608,51	2,3817
9	Hava	25802,15	29,8	101,32	429,3	3,893
10	Hava	25802,15	45	101,32	444,57	3,944
11	Terminol VP-I	936,72	120	23	181,30	0,54
12	Terminol VP-I	318,5	400	23	800,50	1,71
13	Terminol VP-I	318,5	120	15	181,30	0,54
14	Eriyik tuz	417,3	390	–	483,06	–
18	Eriyik tuz	417,3	111	–	19,92	–

Tablo 4.6. R600a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli güç çevrimi için güneş olmadığı zamanda her bir noktanın termodinamik özellikleri

Nokta	Akışkan	\dot{m} kg/s	T °C	P kPa	h kJ/kg	s kJ/kgK
1	R718	40,56	81,32	50	340,5	1,091
2	R718	40,56	81,35	3000	343,57	1,091
3	R718	40,56	380	3000	3185,87	6,8543
4	R718	40,56	81,32	50	2503,75	6,8543
5	R600a	241,68	41,33	550	299,66	1,3369
6	R600a	241,68	41,54	1100	300,69	1,3369
7	R600a	241,68	75	1100	656,45	2,3817
8	R600a	241,68	43,85	550	608,51	2,3817
9	Hava	4023,36	19,9	101,32	419,3	3,859
10	Hava	4023,36	45	101,32	444,57	3,944
15	Eriyik tuz	257,27	388,22	–	480,11	–
16	Eriyik tuz	257,27	388,22	–	480,11	–
17	Eriyik tuz	257,27	112,79	–	22,90	–

R600a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli güç çevrimi sistemdeki her bir bileşenin enerji ve ekserji analizi sonuçları Tablo 4.7'de verilmiştir. Ayrıca NBD analizi sonuçları Tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4. 7. R600a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli güç çevriminde sistemin herbir bileşeninin enerji ve ekserji analizi sonuçları

Bileşen	$\dot{E}_{k\ddot{u}t\le, g}$ kW	$\dot{E}_{k\ddot{u}t\le, \check{c}}$ kW	\dot{Q} kW	\dot{W} kW	$\dot{E}x_{k\ddot{u}t\le, g}$ kW	$\dot{E}x_{k\ddot{u}t\le, \check{c}}$ kW	$\dot{E}x_Q$ kW	$\dot{E}x_W$ kW	$\dot{E}x_d$ kW	η %	ε %
PTSC	169728,2	254946,9	643506,1	542,12	19288,19	92949,78	640475,6	542,12	567356,13	81	86
HE-I	197205,7	193261,5	3944,1	–	100180,1	93572,12	2197,19	–	8805,15	98	91
HE-II	117628,7*	115276,1*	2352,57*	–	12444,5*	51723,16*	1292,02*	–	74013,34*	98	81
HE-III	382810,98	375154,8	7656,22	–	183441	162698,5	4265,14	–	25007,61	98	85
HE-IV	285522,2	279811,8	5710,44	–	125381,6	100018,8	907,26	–	26270,11	98	79
	87734,15*	85979,47*	1754,68*	–	38526,77*	30733,37*	278,78*	–	8072,18*	98	79
P- I	44947,82	45348,84	–	501,27	2608,04	3009,05	–	501,27	100,25	99	97
	13811,3*	13934,6*	–	154,03*	801,39*	924,61*	–	154,03*	30,81*	99	97
P- II	235688,7	236505,9	–	1021,44	40512,9	41330,05	–	1021,44	204,28	99	99
	72421,5*	72672,59*	–	313,86*	12448,64*	12699,74*	–	313,86*	62,77*	99	99
P- III	55962,94	55962,94	–	9,24	13173,1	18693,4	–	9,24	588,94	99	95
T- I	420503,6	330470,1	–	76528,5	151367,4	61333,88	–	76528,5	13505,0	79	91
	129210,7*	101545,5*	–	23515,3*	46511,5*	18846,4*	–	23515,3*	4149,7*	78*	91*
T- II	516317,7	505933,6	–	8826,44	76137,59	65753,55	–	5526,44	1557,61	96	97
	158652,1*	155461,3*	–	2712,15*	23395,26*	20204,49*	–	2712,15*	478,62*	97	98
Kondenser	270244,9	264840	5404,89	516,04	95031,69	67840,86	1355,614	516,04	26351,36	97	83
	83039,79*	81379*	1660,79*	80,47*	25065,01*	16709,92*	416,55*	80,47*	8019,01*	98	82
Tüm Sistem										19,08	20,49

* güneş olmadığı zamanı tanımlar

Tablo 4.8. R600a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli güç çevriminin NBD analizi sonuçları

Yatırım	Bugün	5	10	15	20
GA maliyeti	-67.736.850,0				
TED maliyeti	-15.116.068,88				
GB maliyeti	-8.766.945,85				
Toplam maliyet	-91.619.864,73				
Hurda maliyeti	-9.161.986,47				
İlk yatırım maliyeti	-82.457.878,26				
Nakit Akışı (US\$)					
Bakım onarım maliyeti	-12.368.681,74	-618.434,09	-618.434,09	-618.434,09	-618.434,09
Personel giderleri	-92.789,01	-92.789,01	-92.789,01	-92.789,01	-92.789,01
Elektrik üretimi	20.724.829,66	20.724.829,66	20.724.829,66	20.724.829,66	20.724.829,66
Toplam nakit akışı	8.263.349,91	20.013.597,56	20.013.597,56	20.013.597,56	20.013.597,56
İskonto oranı	1	0.62	0.39	0.24	0.15
Bugünkü değer	-82.457.878,26	12.426.869,48	7.014.643,85	4.355.541,94	2.974.893,75
NBD (US\$)			87.929.159,81		

Tablo 4.8’de görüldüğü gibi R600a soğutucu akışkanının kullanıldığı güneş enerjisi destekli iki kademeli güç çevriminin ilk yatırım maliyeti 82 milyon US\$ olarak belirlenmiştir. Maliyet analizi sonunda sistemin 5. yıldan sonra karlı hala geldiği ve 20 yıl sonunda 87,82 milyon US\$ kar sağlanabileceği belirlenmiştir.

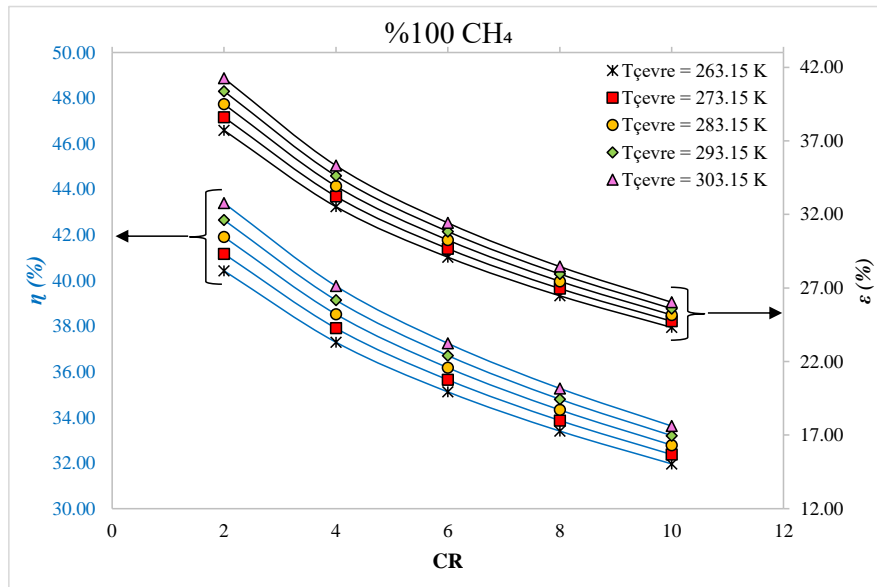
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde ORC’de R152a soğutucu akışkanının kullanıldığı sistem hem termodinamik açıdan hem de ekonomik açıdan R600a kullanılan sisteme göre daha verimli ve karlı olduğu belirlenmiştir.

4.2. Biyogaz Destekli Kojenerasyon Çevrimi

Tasarlanan sistemin ilk aşamasında biyokütle çürütme alanının tasarımı gerçekleştirilmiştir. Günlük belediye atık miktarlarına göre gerekli çürütme tankı boyutu ve biyogaz depolama hacmi belirlendi. İkinci aşamada ise kojenerasyon çevrimini içeren sistem çeşitli parametre değerleri altında termodinamik açıdan analiz edildi.

Çürütücü tankların boyutları, günlük atık miktarı ve HBS dikkate alınarak belirlendi. Buna göre 7m yüksekliğindeki bir çürütücü tank için gerekli tank çapı 20m olarak belirlenmiştir. V_T ve V_{pds} değerleri sırasıyla 1300 m³ ve 780 m³'dür. Ayrıca bu tankların biyogaz depolama hacimleri sırasıyla 260 m³ ve 156 m³'dür. Yalıtım malzemesinin kalınlığı arttıkça ısı kaybı bir miktar azalmakta, ancak belirli bir noktadan sonra çevreye ısı kaybı başlamaktadır. Bu nokta kritik yarıçap olarak adlandırılmaktadır ve 7mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer üzerinde seçilen herhangi bir yalıtım kalınlığı tank için uygun yalıtım kalınlığını temsil eder. Bu nedenle literatürdeki çalışmalar dikkate alındığında yalıtım kalınlığı 80 mm olarak kabul edilmiştir (Akbulut vd., 2021). Sonuç olarak sistemden 6396 m³/gün biyogaz elde edilebileceği belirlenmiştir. Biyogazın kimyasal bileşiminin metan (CH₄) ve karbondioksitten (CO₂) oluştuğu varsayılmıştır.

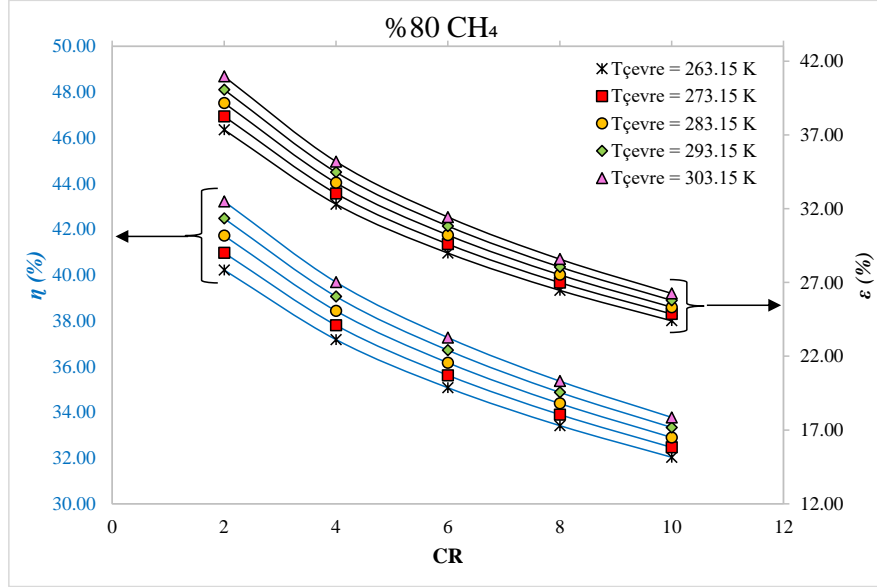
Tasarlanana sistemin analizi için belirlenen parametre değerleri şu şekildedir; sıkıştırma oranı (CR) = 2-10, $T_{çevre}$ = -10 – 30 °C, CH₄ oranı= %60 – 100. Bu çalışmada nemsiz hava koşulları dikkate alınmıştır. $T_{çevre}$ ve CR 'deki değişimin sistemin enerji ve ekserji verimi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Şekil 4.5'de yanma odasında %100 CH₄ yanması durumunda farklı CR 'ler için enerji (η) ve ekserji (ϵ) verimlerindeki değişimler verilmiştir.



Şekil 4.5. %100 CH₄ yanması durumunda η ve ϵ değişimi

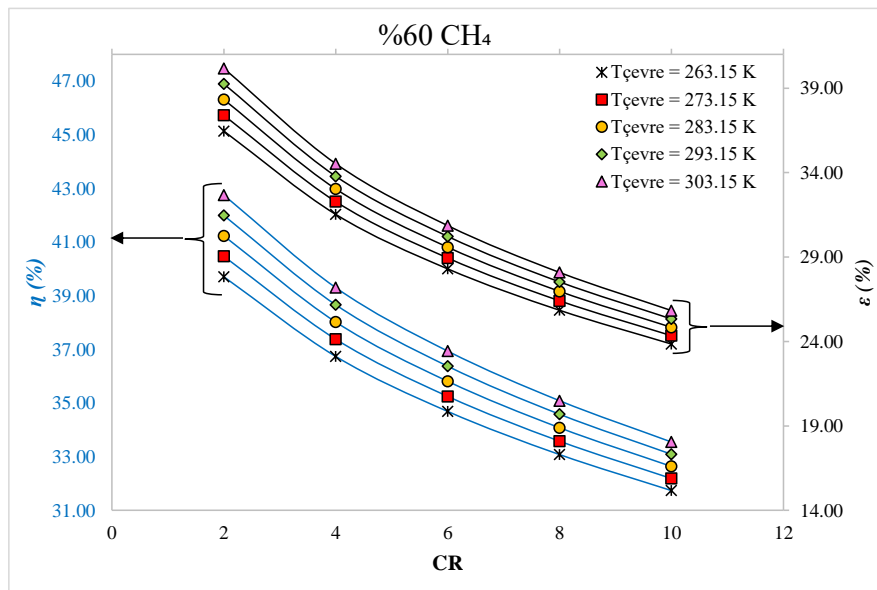
Şekil 4.5 incelendiğinde, farklı CR değerlerinde çevre sıcaklığı arttıkça η ve ϵ 'nin arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, CR arttıkça verimin azaldığı görülmüştür. Buna göre $CR=10$ ve $T_{çevre}=263,15$ olduğunda en düşük enerji ve ekserji verimi sırasıyla %32,39 ve %25,32 olarak belirlenmiştir. En yüksek η ve ϵ ise $CR=2$ ve $T_{çevre}=303,15$ olduğu durumda sırasıyla %43,40

ve %41,25 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.6'da %80 CH₄ yanması durumunda farklı CR'ler için η ve ε değişimi verilmiştir.



Şekil 4.6. %80 CH₄ yanması durumunda η ve ε değişimi

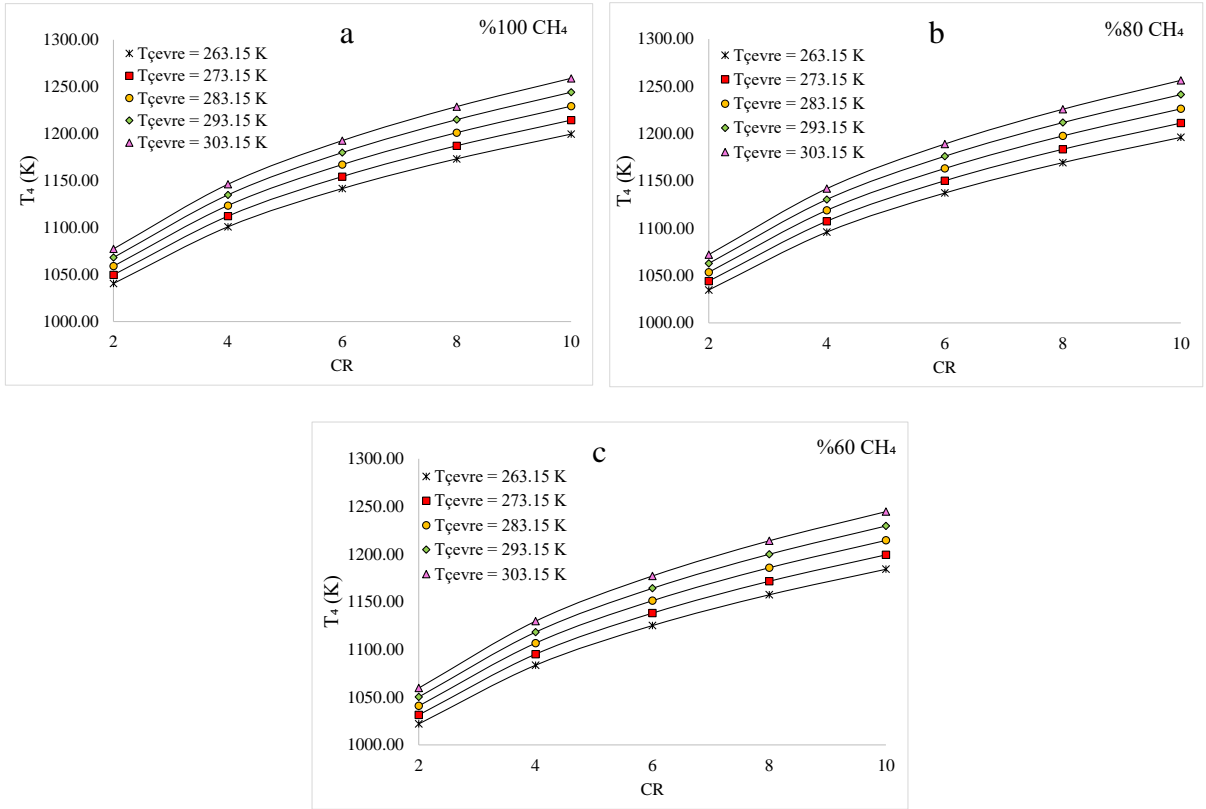
Şekil 4.6 incelendiğinde, farklı CR değerlerinde çevre sıcaklığı arttıkça η ve ε 'nin arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, CR arttıkça verimin azaldığı görülmüştür. Buna göre CR=10 ve T_{çevre}= 263,15 olduğunda en düşük enerji ve ekserji verimi sırasıyla %32,03 ve %24,40 olarak belirlenmiştir. En yüksek η ve ε ise CR=2 ve T_{çevre}= 303,15 olduğu durumda sırasıyla %43,22 ve %40,97 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.7'de %60 CH₄ yanması durumunda farklı CR'ler için η ve ε değişimi verilmiştir.



Şekil 4.7. %60 CH₄ yanması durumunda η ve ε değişimi

Şekil 4.7. incelendiğinde, farklı CR değerlerinde çevre sıcaklığı arttıkça η ve ε 'nin arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, CR arttıkça verimin azaldığı görülmüştür. Buna göre $CR=10$ ve $T_{\text{çevre}}=263,15$ olduğunda en düşük enerji ve ekserji verimi sırasıyla %31,74 ve %23,85 olarak belirlenmiştir. En yüksek η ve ε ise $CR=2$ ve $T_{\text{çevre}}=303,15$ olduğu durumda sırasıyla %42,75 ve %40,17 olarak belirlenmiştir.

Farklı metan oranlarında elde edilen verim değerleri incelendiğinde, beklenildiği gibi metan gazı oranındaki artış sistem verimini arttırmıştır. Benzer şekilde çevre sıcaklığındaki artışta sistem verimi üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Çevre sıcaklığı aynı zamanda yanma sürecini hızlandırdığı için yanma sonu ürün sıcaklığını (T_4) da etkiler. Şekil 4.8.'de farklı T_a değerleri için T_4 ve CR arasındaki değişim verilmiştir.

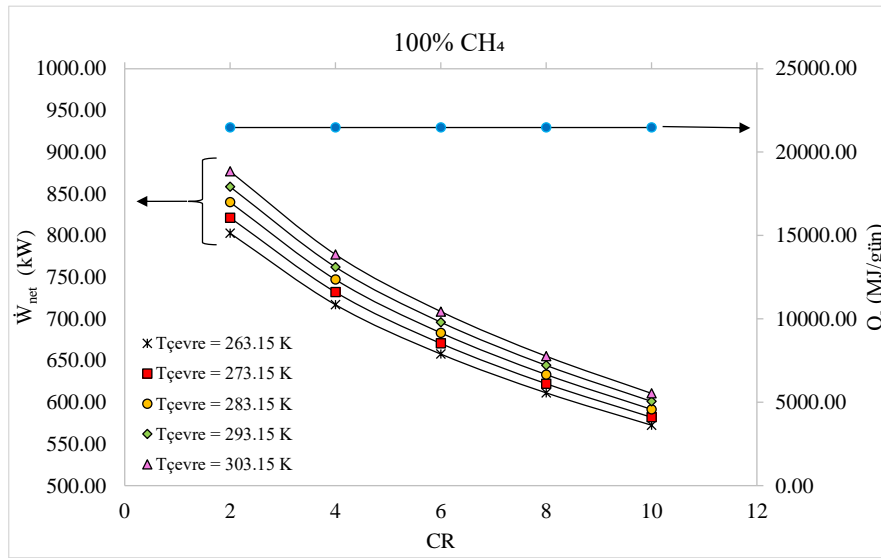


Şekil 4.8. (a) %100 CH₄ için, (b) %80 CH₄ için, (c) %60 CH₄ için, CR 'nin yanma sonu ürün sıcaklığına etkisi

Şekil 4.8.'de CH₄ ve CR değerlerine göre T_4 sıcaklığının değişimi gösterilmektedir. %100 CH₄'ün yanması sonucunda T_4 'ün $T_{\text{çevre}}$ ve CR 'ye göre değişimi incelendiğinde, $T_{\text{çevre}}=303,15$ ve $CR=10$ olduğundan en yüksek $T_4=1259,02$ K, $T_{\text{çevre}}=263,15$ ve $CR=2$ olduğundan en yüksek $T_4=1040,57$ K olarak belirlenmiştir. %80 CH₄'ün yanması sonucunda T_4 'ün $T_{\text{çevre}}$ ve CR 'ye göre değişimi incelendiğinde, $T_{\text{çevre}}=303,15$ ve $CR=10$ olduğundan en

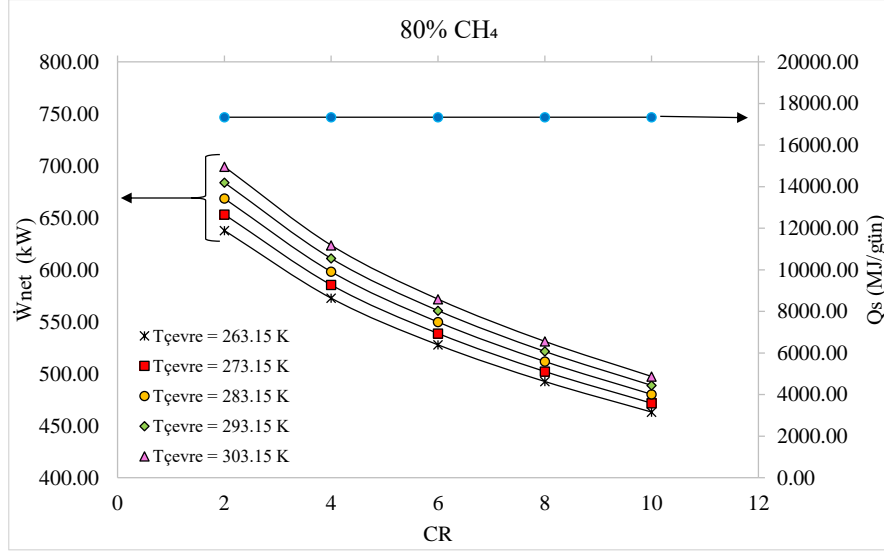
yüksek $T_4= 1256,35$ K, $T_{\text{çevre}} =263,15$ ve $CR= 2$ olduğundan en yüksek $T_4= 1034,72$ K olarak belirlenmiştir. %60 CH_4 'ün yanması sonucunda T_4 'ün $T_{\text{çevre}}$ ve CR 'ye göre değişimi incelendiğinde, $T_{\text{çevre}} =303,15$ ve $CR =10$ olduğundan en yüksek $T_4= 1244,48$ K, $T_{\text{çevre}} =263,15$ ve $CR= 2$ olduğundan en yüksek $T_4= 1021,95$ K olarak belirlenmiştir. Buna göre çevre şartlarının ve sıkıştırma oranının yanma sürecine önemli etkileri olduğu söylenebilir.

Sistemden elde edilen net güç üretimi (\dot{W}_{net}) ve TED sistemindeki ısı depolama miktarı (\dot{Q}_s), farklı metan gazı oranlarında incelenmiştir. Buna göre, Şekil 4.9'da %100 CH_4 yanması durumunda \dot{W}_{net} ve \dot{Q}_s değerlerinin değişimi gösterilmiştir.



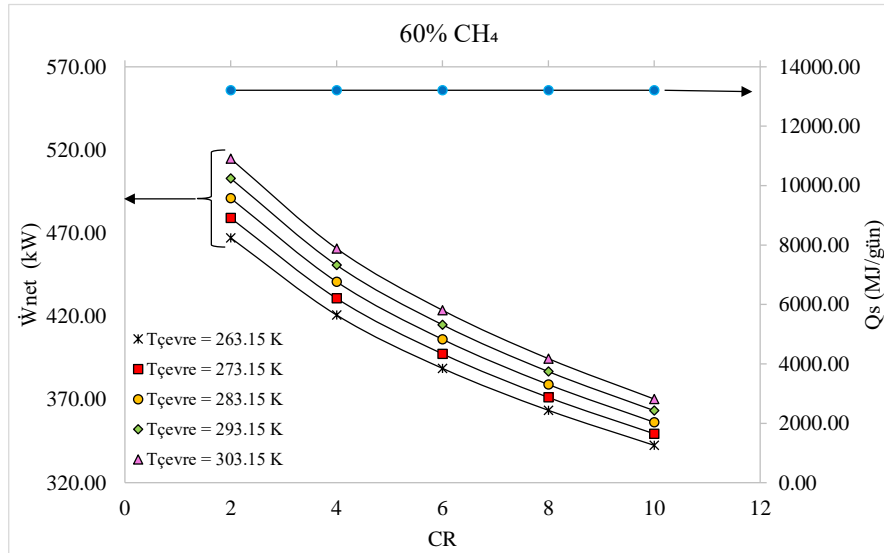
Şekil 4.9. %100 CH_4 yanması durumunda \dot{W}_{net} ve \dot{Q}_s değişimi

Şekil 4.9 incelendiğinde, güç üretiminin $T_{\text{çevre}}$ ile doğru orantılı, CR ile ters orantılı olarak arttığı görülmektedir. Buna göre en düşük güç üretimi $T_{\text{çevre}} =263,15$ ve $CR =10$ olduğu durumda 572,47 kW, en yüksek güç üretimi ise $T_{\text{çevre}} =303,15$ ve $CR =2$ olduğu durumda 876 kW olarak belirlenmiştir. TED sisteminde depolana atık ısının çevre sıcaklığı ve sıkıştırma oranı gibi parametrelerden etkilenmediği bundan dolayı sabit kaldığı ve günlük 21.470,86 MJ ısının depolanabileceği belirlenmiştir. Şekil 4.10'da %80 CH_4 yanması durumunda \dot{W}_{net} ve \dot{Q}_s değerlerinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.10. %80 CH₄ yanması durumunda \dot{W}_{net} ve \dot{Q}_s değişimi

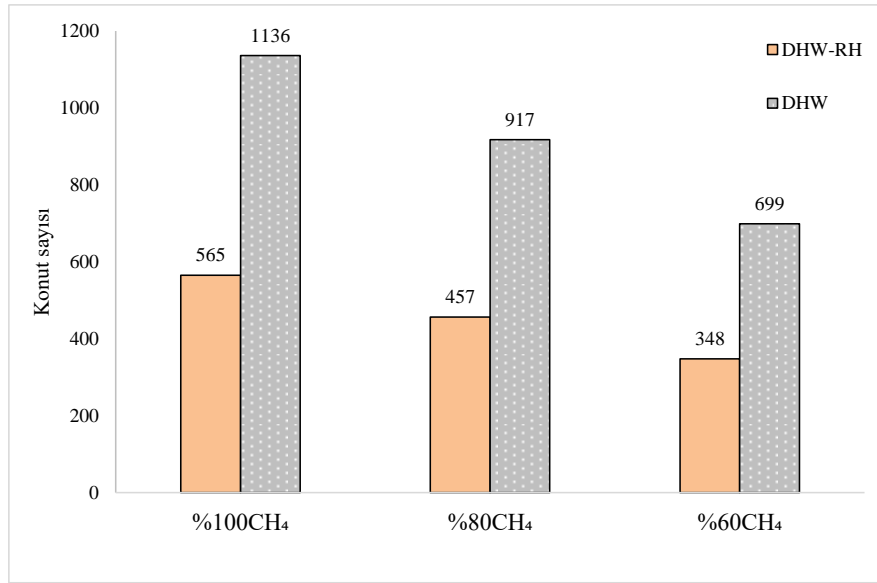
Şekil 4.10 incelendiğinde, güç üretiminin $T_{çevre}$ ile doğru orantılı, CR ile ters orantılı olarak arttığı görülmektedir. Buna göre en düşük güç üretimi $T_{çevre} = 263,15$ ve $CR = 10$ olduğu durumda 463,19 kW, en yüksek güç üretimi ise $T_{çevre} = 303,15$ ve $CR = 2$ olduğu durumda 699,95 kW olarak belirlenmiştir. TED sisteminde depolana atık ısının çevre sıcaklığı ve sıkıştırma oranı gibi parametrelerden etkilenmediği bundan dolayı sabit kaldığı ve günlük 17.340,4 MJ ısının depolanabileceği belirlenmiştir. Şekil 4.11'de %60 CH₄ yanması durumunda \dot{W}_{net} ve \dot{Q}_s değerlerinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.11. %60 CH₄ yanması durumunda \dot{W}_{net} ve \dot{Q}_s değişimi

Şekil 4.11 incelendiğinde, güç üretiminin $T_{çevre}$ ile doğru orantılı, CR ile ters orantılı olarak arttığı görülmektedir. Buna göre en düşük güç üretimi $T_{çevre} = 263,15$ ve $CR = 10$ olduğu

durumda 342,49 kW, en yüksek güç üretimi ise $T_{\text{çevre}} = 303,15$ ve $CR = 2$ olduğu durumda 514,73 kW olarak belirlenmiştir. TED sisteminde depolana atık ısının çevre sıcaklığı ve sıkıştırma oranı gibi parametrelerden etkilenmediği bundan dolayı sabit kaldığı ve günlük 13.209,9 MJ ısının depolanabileceği belirlenmiştir. TED sisteminde depolana ısı, yaz aylarında konutların sıcak su (DHW) ihtiyacı için kullanılabilir, kış aylarında hem sıcak su hem de ısınma (DHW-RH) ihtiyacı için kullanılabilir. Şekil 4.12’de farklı metan gazı oranlarının incelendiği koşullarda TED sisteminde depolana ısıdan kaç konutun faydalanabileceği gösterilmektedir.



Şekil 4.12. Farklı metan gazı oranlarına göre atık ısıdan yararlanan konut sayıları

Şekil 4.12 görüldüğü gibi %100, %80 ve %60 oranlarında CH₄ yanması durumunda atık ısıdan sırasıyla 1136, 917 ve 699 konutun sıcak su ihtiyacının karşılanabileceği, ayrıca sırasıyla 565, 457 ve 348 konutun hem sıcak su hemde ısınma ihtiyacının karşılanabileceği belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, tasarlanan sistemin termodinamik açıdan en uygun çalışma koşulları CR , CH₄ oranı ve $T_{\text{çevre}}$ ’nin sırasıyla 2, %100 ve 303,15 K olduğu durumda elde edilmiştir. Bu koşullar altında sistemin enerji verimi, ekserji verimi ve net güç üretimi sırasıyla %43,40, %41,25 ve 876,83 kW olarak belirlenmiştir. Ayrıca TED sisteminde depolana ısı ile 1136 konutun sıcak su ihtiyacının ve 565 konutun hem sıcak su hem de ısınma ihtiyacının karşılanabileceği belirlenmiştir. Tasarlanan sistemin herbir noktasına ait termodinamik özellikler Tablo 4.9’da verilmiştir.

Tablo 4.9. Biyogaz destekli kojenerasyon çevriminin her bir noktasına ait termodinamik özellikler

Nokta	\dot{m} (kg/s)	T (K)	P (kPa)	\dot{E} (kW)	$\dot{E}x$ (kW)
1	3,18	303,15	101,3	970,32	6536,63
2	3,18	380,51	202,65	1219,85	6791,13
3	0,053	313,15	–	50,02	107,29
4	3,23	1259,02	204,68	3863,05	9505,94
5	3,23	729,53	200	2541,71	8184,59
6	3,23	373,15	180	1289,50	6932,34
7	2,82	318,15	35	530,48	7,538
8	2,82	318,45	50	534,01	7,775
9	2,82	335,01	45	943,05	53,476

Sistemdeki her bir bileşenin enerji ve ekserji analizi sonuçları Tablo 4.10’da verilmiştir. Sonuçlar, saf metanın yanması daha verimli bir yanma süreci sağlandığını göstermiştir. Buna bağlı olarak daha yüksek yanma sonu ürün sıcaklığı elde etmek mümkündür. Bu sayede sistemden hem daha yüksek güç üretimi hem de ısı kazanımı sağlanır.

Tablo 4.10. Biyogaz destekli kojenerasyon çevrimindeki bileşenlerin enerji ve ekserji analizi sonuçları

Bileşen	\dot{Q} (kW)	\dot{W} (kW)	$\dot{E}x_Q$ (kW)	$\dot{E}x_W$ (kW)	$\dot{E}x_d$ (kW)	η %	ε %
AC	–	290,15	–	290,15	48,98	98,78	96,78
CC	46,50	–	33,63	–	2573,88	44,27	67,29
GT	–	1136,35	–	1136,35	184,99	41,23	78,16
HE	25,04	–	14,81	–	1100,57	98	85,70
P	–	13,24	–	13,24	12,57	98,84	64,65
Tüm sistem						43,40	41,25

Sonuç olarak enerji ve ekserji verimleri açısından incelendiğinde %100 CH₄ içeren gazın tüm parametre değerlerinde en iyi sonuçları verdiği belirlenmiştir. Buna göre gazın CO₂’den ayrıştırılması sistemden elde edilebilecek net güç üretimini artırır. Benzer şekilde, depolanan atık ısı miktarındaki artış sayesinde daha fazla konutun sıcak su ve ısınma ihtiyacı karşılanabilir. Sistem CR’deki değişim üzerinden değerlendirildiğinde, CR arttıkça yanma sıcaklığı da artmakta ve gaz türbinindeki güç üretimi artmaktadır. Ancak, CR’deki artış kompresör için gereken gücü arttırdığından, sistemin net güç üretimi azalır.

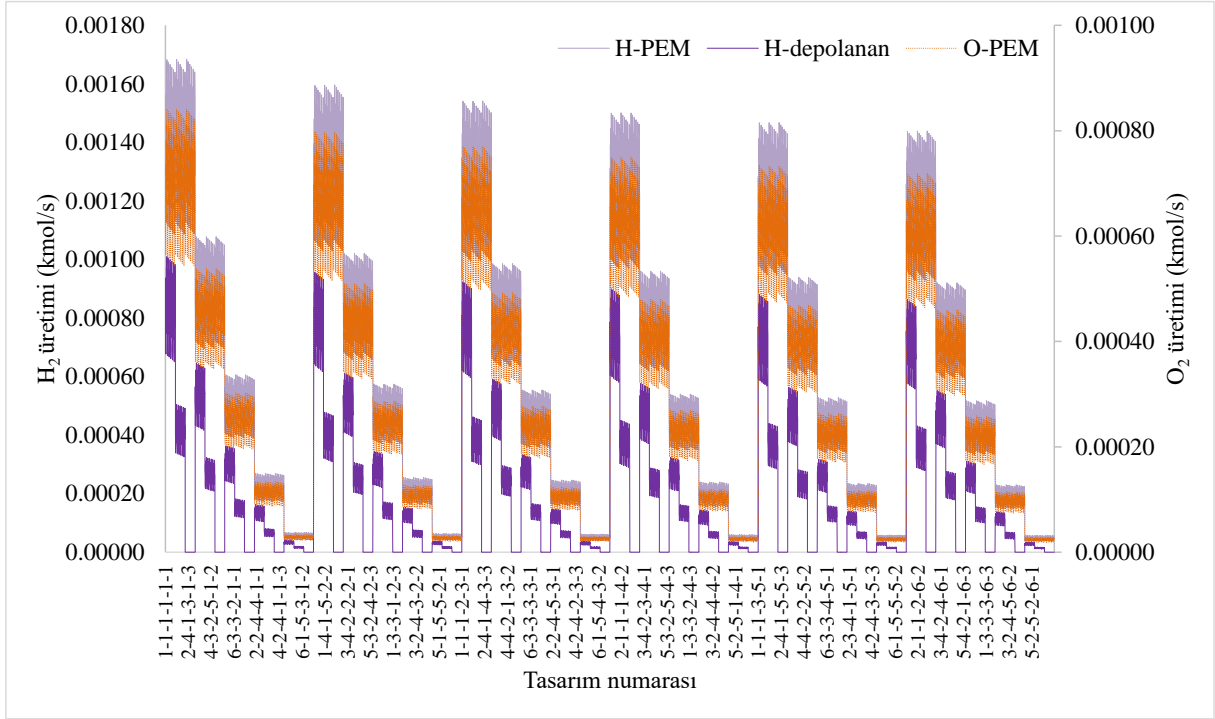
4.3. Biyogaz Destekli Multijenerasyon Çevriminin PEM elektrolizörü ile Entegrasyonu

Tasarlanan sistem, nem (φ), hava fazlalık katsayısı (λ), güç kullanım oranı (PR), CR, J ve H_2 kullanım oranı olmak üzere çeşitli parametre değerlerine göre analiz edilmiştir. Bu parametre değerleri ve bu değerler için tanımlanan numaralandırma Tablo 4.11’de verilmiştir. Bu bağlamda 10.800 tasarım gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.11. Biyogaz destekli PEM elektrolizörü entegre edilen sistemin parametre değerleri ve tasarım numaraları

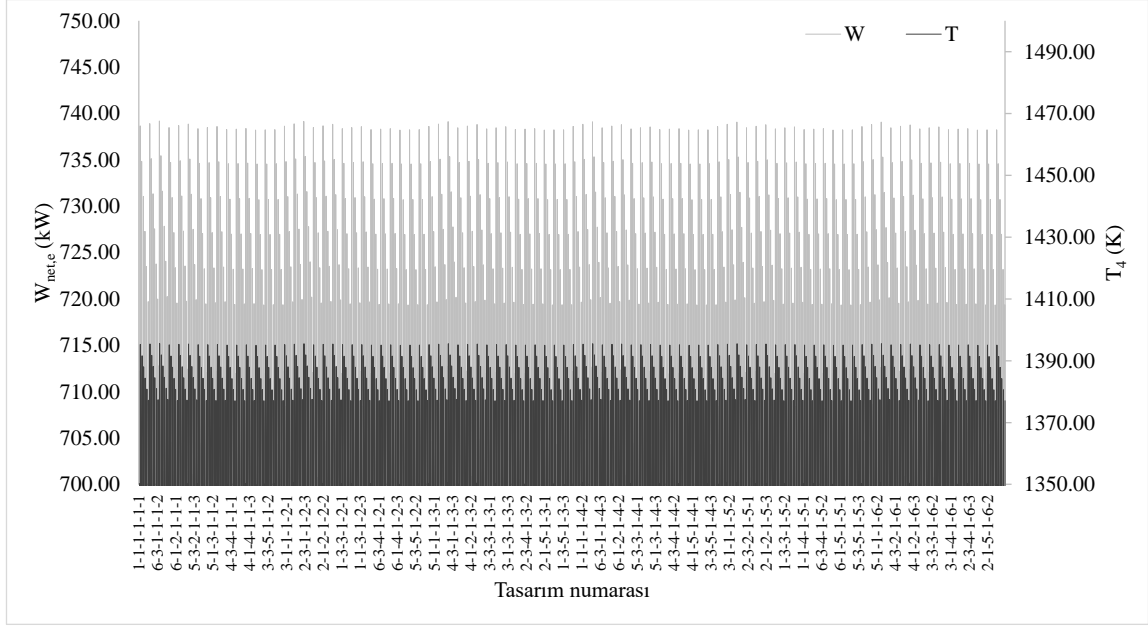
φ (%)		λ		PR (%)		CR		J (A/m ²)		H ₂ oranı (%)	
No	Değer	No	Değer	No	Değer	No	Değer	No	Değer	No	Değer
1	0	1	3.5	1	100	1	2	1	1000	1	40
2	20	2	3.2	2	80	2	4	2	2000	2	70
3	40	3	3	3	60	3	6	3	3000	3	100
4	60	4	2.8	4	40	4	8	4	4000		
5	80			5	20	5	10	5	5000		
6	100							6	6000		

Tablo 4.10’da görüldüğü gibi bir tasarımı tanımlamak için 2-3-5-1-2-1 gibi bir numaralandırma sistemi kullanıldığında, bu şu anlama gelir; $\varphi = 20\%$, $\lambda = 3$, PR = 20% , CR = 2, $J = 2000$ A/m², H₂ oranı = 40% ’dır. Parametreler arasında PR ve hidrojen oranı sistem performansı üzerinde önemli etkilere sahiptir. PR 20% - 100% arasında incelenmiştir. Bu oran Brayton çevriminde üretilen net gücün belirli bir kısmının PEM elektrolizörünü çalıştırmak için kullanıldığı anlamına gelir. Örneğin PEM ünitesinde gücün 20% ’si hidrojen ve oksijen üretimi için kullanılırken, kalan enerji şehir şebekesine aktarılmaktadır. Benzer şekilde yanmayı etkileyen hidrojen oranı 40% - 100% arasında parametrik olarak değerlendirilmiştir. Örneğin PEM’de üretilen hidrojenin 40% ’ı yanma odasına geri beslenirken, geri kalanı depolama için ayrılmaktadır. Şekil 4.13’de farklı tasarımlara göre PEM’de üretilen hidrojen ve oksijen miktarındaki değişimler verilmiştir.



Şekil 4.13. PEM elektrolizöründe H₂ ve O₂ üretim miktarı

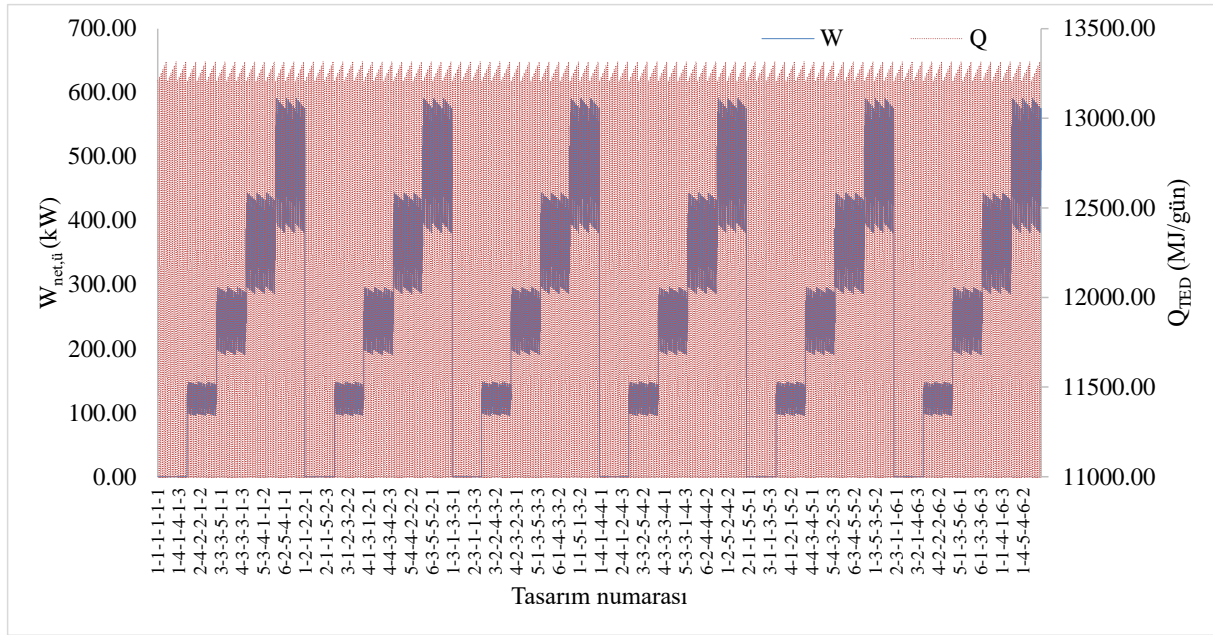
Şekil 4.13’de görüldüğü gibi H₂ üretimi 0,00004 kmol/s ile 0,00168 kmol/s arasında değişirken, O₂ üretimi 0,00002 kmol/s ile 0,00084 kmol/s arasında değişmektedir. Üretilen hidrojenin belirli bir oranı yanma odasına beslenirken, geri kalanı depolanır. Hidrojen besleme oranına bağlı olarak 0,0010 kmol/s’ye kadar H₂ depolamak mümkündür. Şekil 4.13’de görüldüğü gibi H₂ ve O₂ değerleri azalan bir eğim göstermektedir. Bu düşüş güç kullanımındaki azalmayla ilgilidir. PEM ünitesine verilen elektrik azaldıkça H₂ ve O₂ üretimi azalmaktadır. Aynı zamanda J değeride H₂ ve O₂ üretimini etkiler. Bunun nedeni, akım yoğunluğundaki artış PEM için gereken elektriği arttırdığı için H₂ ve O₂ üretimi azalır. Hidrojen besleme oranı yanma sonu ürün sıcaklığını (T_4) ve çevrimin iş üretimini ($\dot{W}_{net,e}$)de doğrudan etkiler. Buna göre farklı çalışma parametreleri altında $\dot{W}_{net,e}$ ve T_4 değerlerinin değişimi Şekil 4.14’de gösterilmektedir.



Şekil 4.14. PEM entegre edilen sistemde $W_{net,e}$ ve T_4 'ün farklı tasarım parametrelerine göre değerlendirilmesi

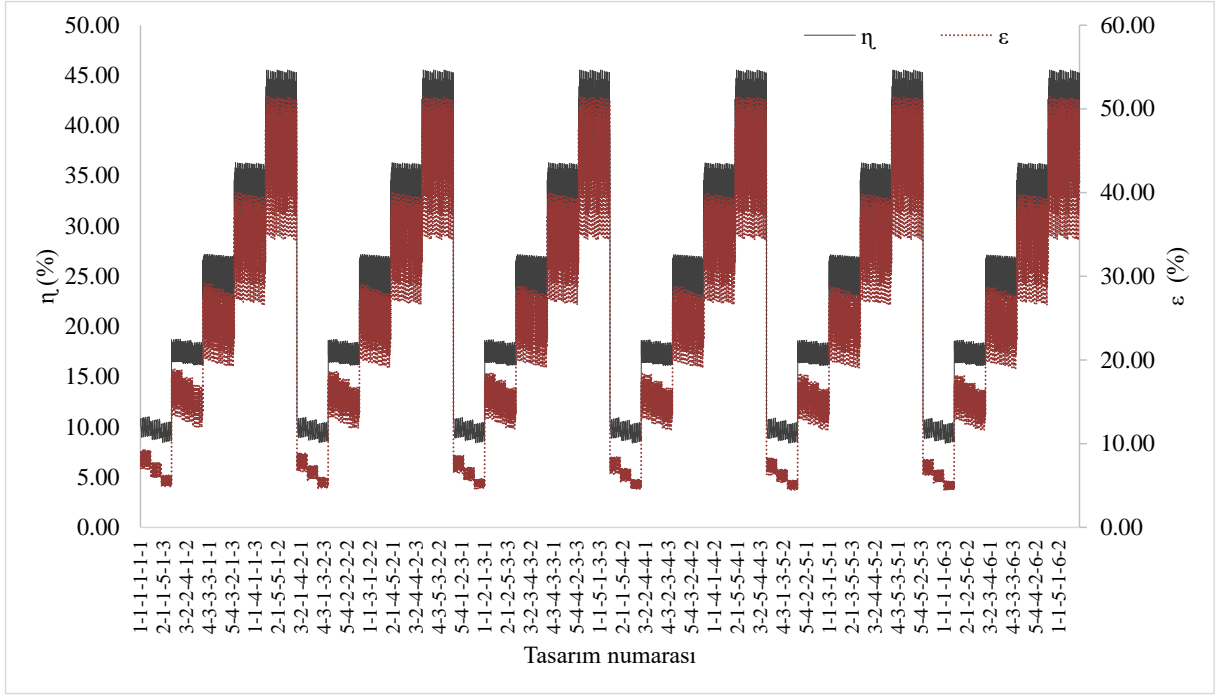
Şekil 4.14'e göre ürün sıcaklığı 106,06 K ile 1395,54 K arasında değişirken, Brayton çevriminden elde edilen net güç üretimi 476,65 kW ile 739,20 kW arasında değildir. Yanma odasına eklenen hidrojen oranıyla hem yanma sonu ürün sıcaklığı hem de türbinde üretilen güç artmaktadır. Net güç üretimini etkileyen bir diğer parametre sıkıştırma oranıdır. Sıkıştırma oranındaki artış, kompresör için gereken gücü arttırarak net güç çıkışında azalmaya neden olur. Ayrıca havadaki nem oranının artması da yanmayı olumsuz etkileyen bir diğer parametredir. Nemli hava, yanma sıcaklığının düşmesine, bu da güç üretiminin azalmasına neden olur.

PR, sistem performansını etkileyen bir diğer önemli parametredir. Buna göre, PR'ye bağlı olarak sistemden elde edilebilecek net güçteki değişim Şekil 4.15'de gösterilmektedir. Aynı zamanda, farklı tasarım parametreleri altında TED'de depolanabilecek ısı miktarı da Şekil 4.15'de gösterilmektedir.



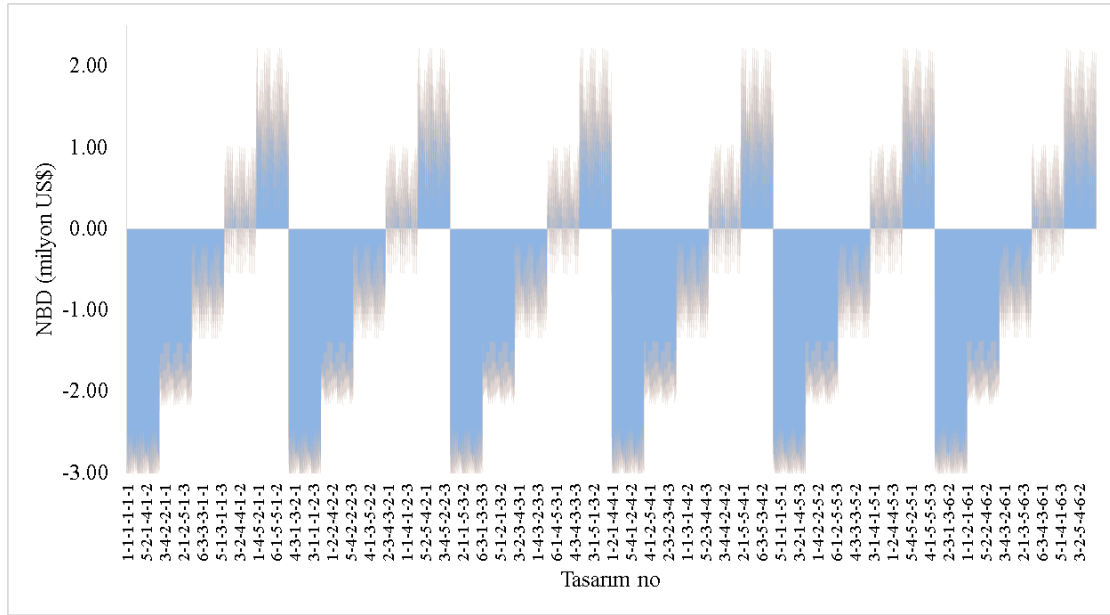
Şekil 4.15. PEM entegre edilen sistemde elektrik üretimi ve depolanan ısının değerlendirilmesi

Şekil 4.15’de görüldüğü gibi hidrojen üretimi için kullanılan güç oranı azaldıkça şehir şebekesine aktarılabilen elektrik miktarı da artmaktadır. PR= %100 olduğunda sistemde elektrik üretimi yoktur çünkü Brayton çevriminde elde edilen gücün tamamı elektroliz üretiminde kullanılmaktadır. Buna karşılık üretilen gücün %20’si hidrojen üretimi için kullanıldığında geriye kalan 590 kW’a kadar enerji şehir şebekesine gönderilmektedir. Ayrıca TED’de depolanan ısı farklı tasarım parametreleri altında 1.061,06 MJ/gün ile 1.395,54 MJ/gün arasında değişmektedir. Bu ısı yazın 572 ile 708 konutun sıcak su ihtiyacını karşılayabilirken, kışın 284 ile 351 konutun sıcak su ve ısınma ihtiyacını karşılayabilmektedir. Tasarlanan sistemlerin η ve ε değişimi Şekil 4.16’da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Biyogaz destekli, PEM entegre edilen sistemin enerji ve ekserji verimlerinin değişimi

Şekil 4.16'e göre enerji verimi %8,37 ile %45,55 arasında değişirken, ekserji verimi %4,44 ile %51,51 arasında değişmektedir. En düşük enerji ve ekserji verimi, çevrimin ürettiği gücün tamamının yanma odasına beslendiği tasarım değerlerinde elde edilmiştir. Bu durumda sistemin kazanımları yalnızca ısı ve oksijen üretimidir. Buna karşılık en yüksek enerji ve ekserji verimi, üretilen gücün %20'sinin hidrojen üretimi için kullanıldığı ve elde edilen hidrojenin %40'ının yanma odasına beslendiği tasarım değerinde elde edilmiştir. Bu tasarımda elektrik, ısı, hidrojen ve oksijen üretimi sistemin toplam kazanımlarıdır ve çevrimin genel performansını önemli ölçüde etkiler. Maliyet analizi değerlendirmesi Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17. Biyogaz destekli, PEM entegre edilen sistemin maliyet analizi değerlendirmesi

Şekil 4.17 incelendiğinde, NBD sonuçları -3,114,160.18 US\$ ile 2,230,135.53 US\$ arasında değişmektedir. NBD analiz sonuçları doğrudan PR ile ilişkilidir. PR'nin %20 ve %40 olduğu tasarım değerlerinde, NBD pozitif bulunmuş olup, sistemin ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Ancak bazı tasarımlarda güç oranı %40 olmasına rağmen negatif NBD elde edilmiştir. Bu durum yalnızca güç oranının değil aynı zamanda sıkıştırma oranı, hidrojen oranı ve havanın nemi gibi parametrelerin de sistemin ekonomik değerlendirmesi üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla ekonomik sonuçlar, tasarım parametrelerinin birbirleriyle ilişkisine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Daha yüksek yanma sonu sıcaklıkları ve güç üretimi elde etmek için çevrimden üretilen tüm gücün hidrojen üretimi için kullanılması ve üretilen hidrojenin yanma odasına beslenmesi pratik olarak uygulanabilir bir yaklaşım olarak düşünülebilir. Ancak termodinamik ve ekonomik analizler, elektrikli ısı, hidrojen ve oksijen üretiminin aynı anda gerçekleştiği tasarımların, sistemin genel performansı ve uygulanabilirliği açısından daha yüksek verimlilik ve sürdürülebilirlik sağladığını göstermiştir. Buna göre hem termodinamik hem de ekonomik açıdan en uygun sistem tasarımı 4-4-5-1-6-3 numaralı tasarımdır. Bu tasarım numarası için parametre değerleri şu şekildedir; $\varphi = \%60$, $\lambda = 2.8$, $PR = \%20$, $CR = 2$, $J = 6000 \text{ A/m}^2$, H_2 oranı = %100. Bilecik gibi ılıman iklimli bölgeler %40-60 arasında nem oranına sahiptir bundan dolayı bu çalışmada havanın nemi %60 olarak kabul edilmiştir. Belirlenen tasarım numarasına ait termodinamik özellikler Tablo 4.12'de verilmiştir. Sistemdeki her bir bileşenin enerji ve ekserji analizi sonuçları Tablo 4.13'de verilmiştir.

Tablo 4.12. Biyogaz destekli, PEM elektrolizörü entegre edilen sistemde her noktanın termodinamik özellikleri

Nokta	\dot{m} (kg/s)	T (K)	P (kPa)	\dot{E} (kW)	\dot{E}_x (kW)
1	1,53	298,22	101,325	458,02	0
2	1,53	374,68	202,65	577,23	3383,91
3	0,09	313,15	-	60,20	118,12
4	1,62	1209,01	204,68	2196,15	5136,06
5	1,62	705,84	200	1215,91	257,7
6	1,62	7080,8	180	1215,05	260,05
7	1,62	373,15	162	624,93	14,20
8	3,95	318,15	35	743,96	10,57
9	3,95	318,45	90	744,23	6,20
10	3,95	353,15	81	1322,54	74,86
11	0,00056	283,15	101,325	0,53	-0,0003
12	0,00056	353,15	101,325	0,67	3,29
13	0,00045	353,15	101,325	0,291	1,85
14	0,00011	353,15	101,325	0,60	2,08
15	-	-	-	-	-
16	0,00011	353,15	101,325	0,598	2,022

Tablo 4.13. Biyogaz destekli, PEM elektrolizörü entegre edilen sistemde her bileşenin enerji ve ekserji analizi sonuçları

Bileşen	\dot{Q} (kW)	\dot{W} (kW)	$\dot{E}x_Q$ (kW)	$\dot{E}x_W$ (kW)	$\dot{E}x_d$ (kW)	η (%)	ϵ (%)
AC	-	116,67	-	116,67	104,48	90,44	80,40
CC	1283,89	-	967,28	-	664,74	70,94	81,03
GT	-	843,63	-	843,63	137,34	78,41	97,33
HE-I	1,277	-	1,16	-	0,26	99,81	99,10
PEM	-	145,39	-	145,39	144,75	74,86	83,78
HE-II	11,80	-	5,17	-	172,02	99,40	95,39
P	-	0,27	-	0,27	4,64	99,92	97,25
Tüm sistem						45,38	51,19

Tablo 4.13’de görüldüğü gibi sistemin genel enerji ve ekserji verimi sırasıyla %45,38 ve %51,19 olarak belirlenmiştir. NBD analiz sonuçları Tablo 4.14’de verilmiştir.

Tablo 4.14. Biyogaz destekli, PEM elektrolizörü entegre edilen sistemin NBD analizi sonuçları

Yatırım	Bugün	5	10	15	20
Brayton çevrimi maliyeti	-3.049.467,23				
Çürütme alanı maliyeti	-1.149.979,05				
PEM ünitesi maliyeti	-145.391,76				
TED maliyeti	-11.653,30				
Toplam maliyet	-4.356.491,34				
Hurda maliyeti	-435.649,13				
İlk yatırım maliyeti	-3,920,842.21				
Nakit akışı (US\$)					
Bakım onarım maliyeti	-588.126,33	-29.406,32	-29.406,32	-29.406,32	-29.406,32
Personel giderleri	-92.211,79	-92.211,79	-92.211,79	-92.211,79	-92.211,79
Elektrik üretimi	556.908,62	556.908,62	556.908,62	556.908,62	556.908,62
Oksijen kazancı	138,93	138,93	138,93	138,93	138,93
Hidrojen kazancı	0	0	0	0	0
Biyokütle bertarafı	399.529,0	399.529,0	399.529,0	399.529,0	399.529,0
Atık ısı kazancı	34.507,96	34.507,96	34.507,96	34.507,96	34.507,96
Toplam nakit akışı	-3.920.842,21	869.466,40	869.466,40	869.466,40	869.466,40
Kümülatif nakit akışı	-3.920.842,21	426.489,80	4.773.821,82	9.121.153,83	13.468.485,84
İskonto oranı (%13)	1	0.54	0.29	0.16	0.09
Bugünkü Değer	-3.920.842,21	471.911,53	256.134,67	139.019,64	75.454,29
NBD (US\$)			2.186.943,27		

Tablo 4.14’de görüldüğü gibi, Brayton çevrimi maliyeti, ilk yatırım maliyetinin en büyük payını oluşturmaktadır; bunu biyokütle sindirim alanı, PEM ünitesi ve TED sistemi maliyetleri takip edmektedir. Üretilen hidrojenin tamamı yanma proesesinde kullanıldığından, hidrojen satışından kar elde edilememiştir. Ekonomik analiz sonuçları sistemin 5. yıldan itibaren karlı hale geldiğini ve 20 yıllık işletme ömrü sonunda toplam 2,18 milyon US\$ kar elde edilebileceğini göstermektedir.

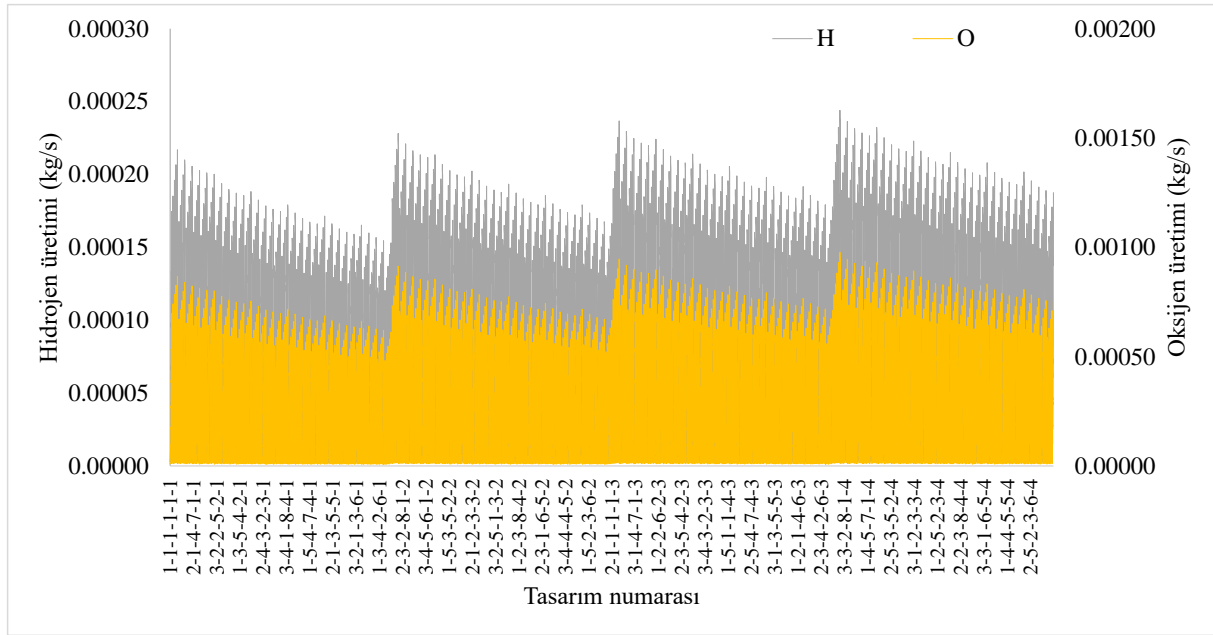
4.4. Biyogaz Destekli Multijenerasyon Çevriminin SOEC Elektrolizörü ile Entegrasyonu

Tasarlanan sistem, φ , λ , CR , PR , J ve T_{SOEC} olmak üzere çeşitli parametre değerlerinde analiz edilmiştir. Bu parametre değerleri ve bu değerler için tanımlanan numaralandırma Tablo 4.15’de verilmiştir. Bu bağlamda 14.400 tasarım gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.15. Biyogaz destekli SOEC elektrolizörü entegre edilen sistemin parametre değerleri ve tasarım numaraları

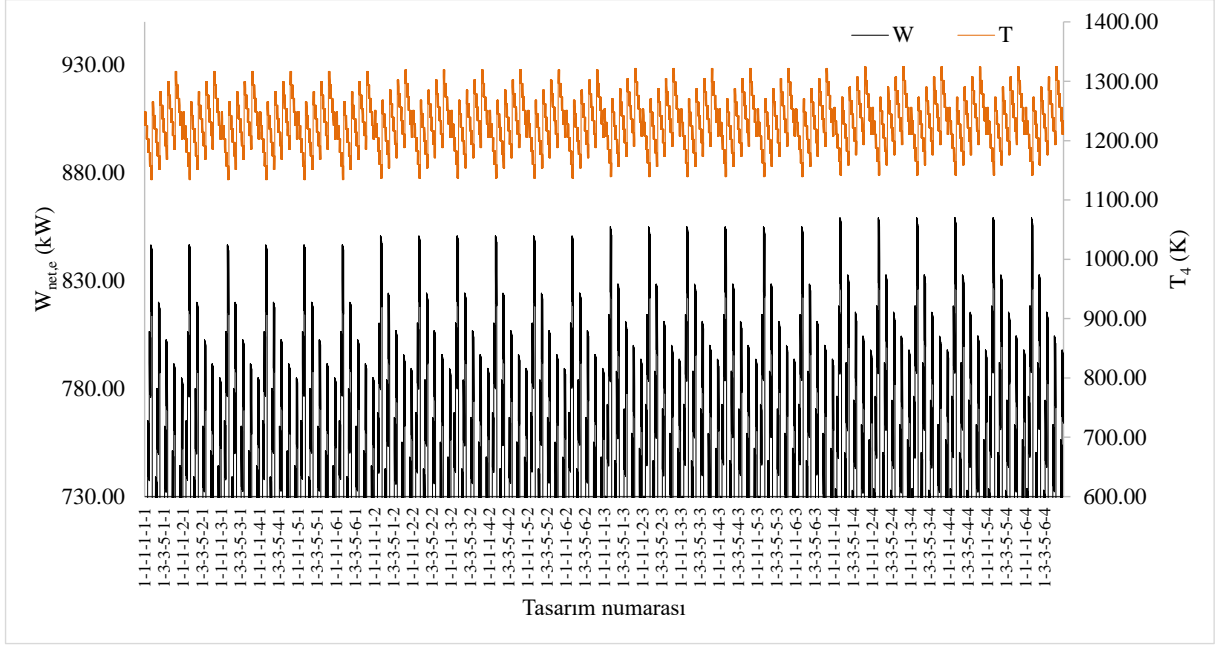
φ (%)		λ		CR		PR (%)		J (A/m ²)		T_{SOEC} (K)	
No	Değer	No	Değer	No	Değer	No	Değer	No	Değer	No	Değer
1	0	1	2,6	1	1,5	1	2	1	1000	1	973
2	50	2	2,7	2	2	2	4	2	2000	2	1023
3	100	3	2,8	3	2,5	3	6	3	3000	3	1073
		4	2,9	4	3	4	8	4	4000	4	1123
		5	3	5	3,5	5	10	5	5000		
						6	12	6	6000		
						7	14				
						8	16				

Tablo 4.15’de görüldüğü gibi bir tasarımı tanımlamak için 2-3-5-5-1-2 gibi bir numaralandırma sistemi kullanıldığında, bu şu anlama gelir; $\varphi = \%50$, $\lambda = 2,8$, $CR = 3,5$, $PR = \%10$, $J = 1000$ A/m², $T_{SOEC} = 1023$ K’dır. PR %2-16 arasında incelenmiştir. Bu oran Brayton çevriminde üretilen net gücün belirli bir kısmının SOEC elektrolizörünü çalıştırmak için kullanıldığı anlamına gelir. SOEC elektrolizöründe üretilen O₂ yanma odasına geri beslenir, hidrojen ise depolanmak üzere ayrılır. Şekil 4.18’de farklı tasarımlara göre SOEC’de üretilen hidrojen ve oksijen miktarındaki değişimler verilmiştir.



Şekil 4.18. SOEC elektrolizöründe H₂ ve O₂ üretim miktarı

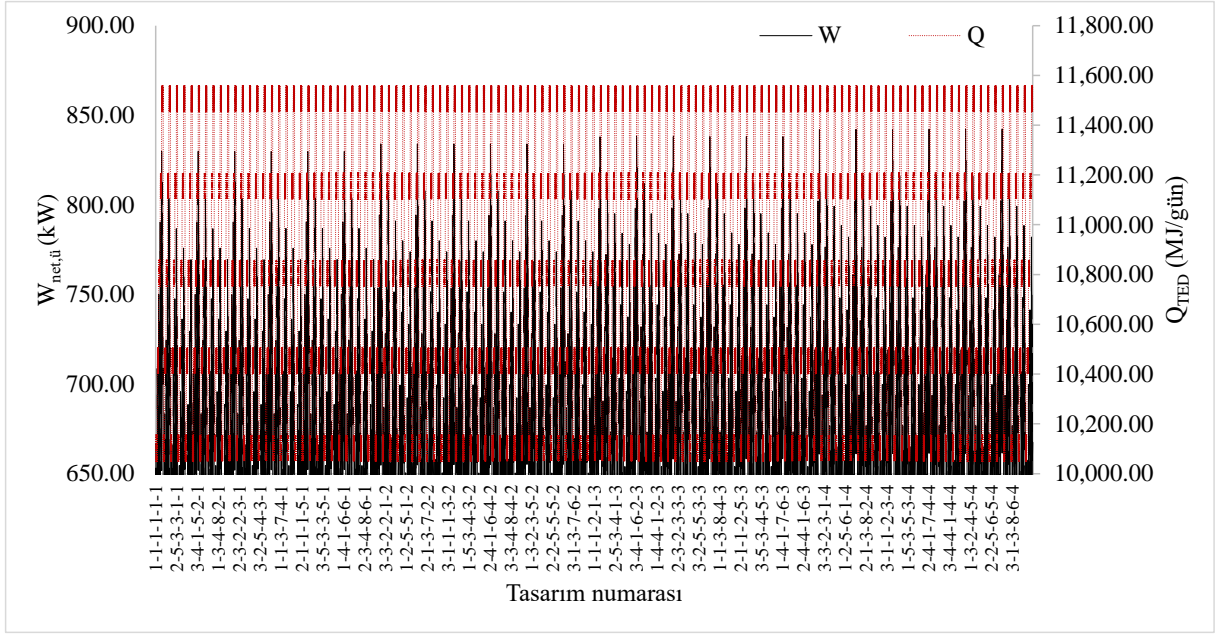
Şekil 4.18’de görüldüğü gibi SOEC ünitesinde H₂ üretimi 0,0000018 kg/s ile 0,00024 kg/s arasında, O₂ üretimi ise 0,0000073 kg/s ile 0,00097 kg/s arasında değişmektedir. Sistemde PR’ye bağlı olarak üretilen oksijenin tamamı yanma odasına geri beslenirken hidrojen depolanmak üzere ayrılır. Bundan dolayı PR’ye bağlı olarak SOEC’de üretilen H₂ ve O₂ miktarı da artış göstermektedir. SOEC’de H₂ ve O₂ üretimini etkileyen bir diğer önemli parametreler J ve T_{SOEC} sıcaklığıdır. J ’nin artması hücre için gerekli elektiriksel gücü arttırmakta ve dolayısıyla H₂ ve O₂ üretiminin azalmasına yol açmaktadır. Buna karşılık, T_{SOEC} sıcaklığındaki artış reaksiyon kinetiğini arttırmakta ve H₂ ve O₂ üretiminde bir artış meydana gelmektedir. Bu parametrelerin değişimi çevrimin iş üretimini ($W_{net,e}$) ve yanma sonu ürün sıcaklığını (T_4) doğrudan etkiler.



Şekil 4.19. SOEC entegre edilen sistemin $\dot{W}_{net,e}$ ve T_4 'ün farklı tasarım parametrelerine göre değerlendirilmesi

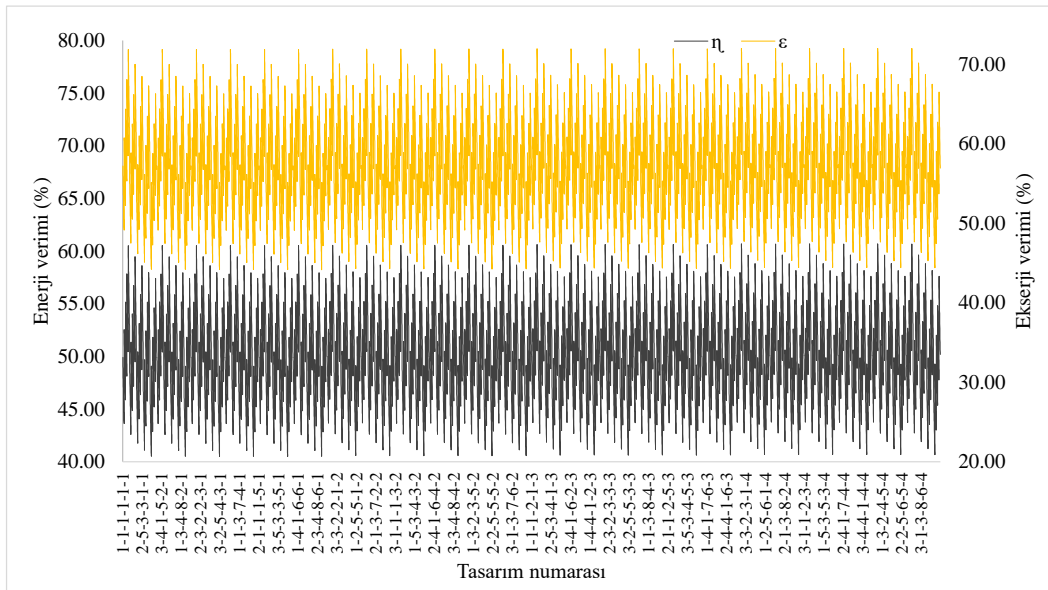
Şekil 4.19'da görüldüğü gibi T_4 , 1134,3 K ile 1324,41 K arasında değişirken, Brayton çevriminde elde edilen net güç üretimi 594,16 kW ile 859,33 kW arasında değişmektedir. Yanma odasına eklenen O_2 miktarının artması T_4 sıcaklığını arttırmaktadır dolayısıyla bu durum çevrimin üreteceği net gücü de artırır. Ancak sistemde SOEC için gerekli sıcaklık, yanma odası çıkışına yerleştirilen bir ısı değiştirici ile sağlanmaktadır. Bundan dolayı T_{SOEC} sıcaklığındaki artış, akışkandan daha fazla ısı çekilmesine neden olmakta, bu durum türbine giren gazın sıcaklığını düşürerek çevrimde üretilen net gücün azalmasına yol açmaktadır. Çevrimde üretilen net gücü etkilenen bir diğer önemli parametre sıkıştırma oranıdır. Sıkıştırma oranının artması, kompresör için gereken gücü arttırdığından çevrimin net güç üretimini azaltmaktadır.

PR'nin değişimi sistemden elde edilen elektrik kazancını da etkilemektedir. Buna göre, PR'ye bağlı olarak sistemden kazanç olarak sağlanan iş ($\dot{W}_{net,\dot{u}}$) ve TED sisteminde depolanabilecek ısı miktarı Şekil 4.20'de verilmiştir.



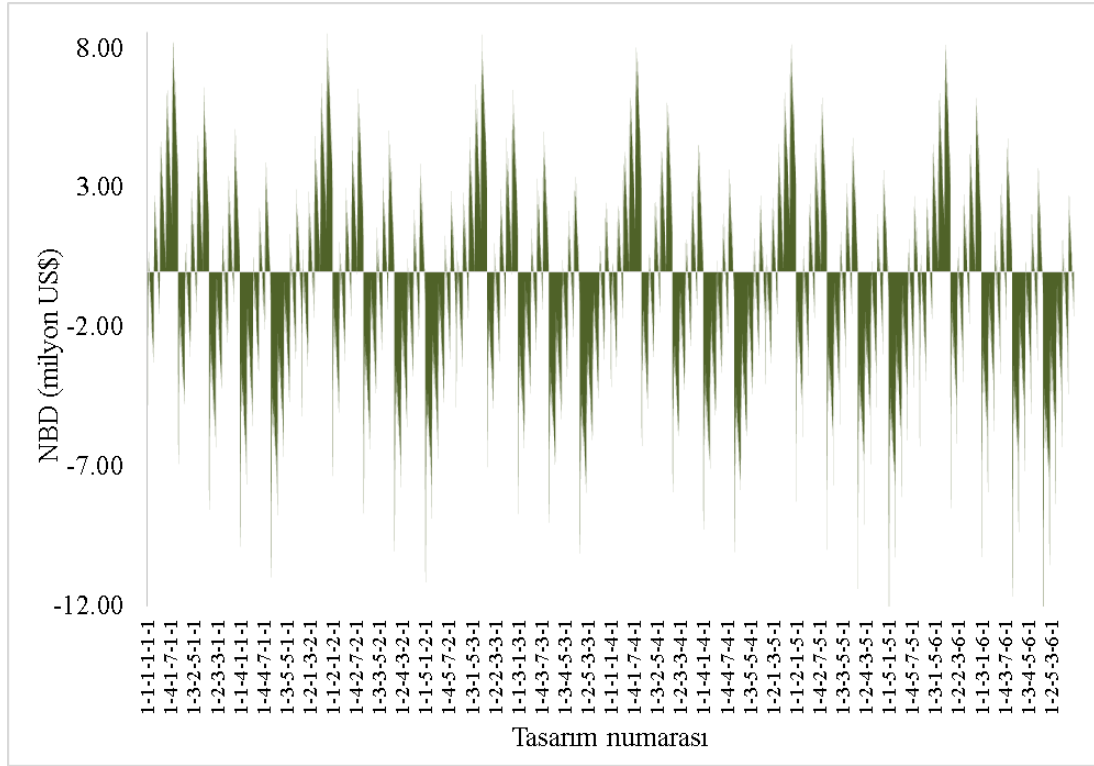
Şekil 4.20. SOEC entegre edilen sistemin elektrik üretimi ve depolanan ısının değerlendirilmesi

Şekil 4.20’de görüldüğü gibi PR’deki artış şehir şebesine aktarılabilir elektrik miktarını azaltmaktadır. Üretilen gücün %2’si SOEC ünitesi için harcandığında geri kalan 842,14 kW’a kadar enerji şehir şebeke hattına gönderilebilir. Ayrıca TED sisteminde depolanan en fazla 11.530 MJ/gün ısı ile yaz aylarında 615 konutun sıcak su ihtiyacı karşılanabilirken kış aylarında 305 konutun hem sıcak su hem de ısınma ihtiyacı karşılanabilir. Tasarlanan sistemin genel enerji ve ekserji verimlerinde değişim Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21. Biyogaz destekli, SOEC entegre edilen sistemin enerji ve ekserji verimlerinin değişimi

Şekil 4.21’de görüldüğü gibi enerji verimi %40,51 ile %60,66 arasında değişirken, ekserji verimi %44,16 ile %71,99 arasında değişmektedir. En düşük enerji ve ekserji verimi %100 nemli hava şartlarında, CR ’nin 3,5 olduğu ve PR ’nin %16 olduğu parametre değerlerinde elde edilmiştir. En yüksek verim değerleri ise nemsiz hava şartlarında, CR ’nin 1,5 olduğu ve PR ’nin %2 olduğu parametre değerlerinde elde edilmiştir. Sistemin ekonomik analizinin değerlendirilmesi Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.22. Biyogaz destekli, SOEC entegre edilen sistemin maliyet analizi değerlendirilmesi

Şekil 4.22 incelendiğinde, NBD sonuçlarının -13.870.318,90 US\$ ile 8.582.734,77 US\$ arasında değiştiği görülmüştür. NBD analiz sonuçları doğrudan PR oranı ile ilişkilidir. Bu orana bağlı olarak sistemden elde edilebilecek elektrik, ısı ve hidrojen miktarı belirlenir. Buna göre, PR oranı arttıkça kar oranının azaldığı görülmüştür, bu oran yaklaşık %10’nun üstüne çıktığında negatif NBD elde edilmiştir. Bu sonuç, bu tasarım parametrelerine ait sistemlerin yatırıma uygun olmadığını gösterir. Analizler sonucunda en yüksek NBD değeri, PR oranının %4 olduğu durumda, nemsiz hava şartlarında elde edilmiştir. Bilecik gibi ılıman bölgelerde hava nemi yaklaşık olarak %40-60 arasındadır bundan dolayı bu çalışmada %50 nemli hava değerlerinde elde edilen en yüksek NBD değeri tasarım için uygun parametre değerleri olarak belirlenmiştir. Buna göre en uygun çalışma parametrelerine sahip sistemin tasarım numarası 2-5-1-2-1-4’dür. Bu tasarım numarası için parametre değerleri şu şekildedir; $\varphi = \%50$, $\lambda = 3$, $PB =$

%4, $CR= 1,5$, $J= 1000 \text{ A/m}^2$, $T_{SOEC} =1123$. Belirlenen tasarım numarasına ait termodinamik özellikler Tablo 4.16’de verilmiştir. Sistemdeki herbir bileşenin enerji ve ekserji analizi sonuçları Tablo 4.17’de verilmiştir.

Tablo 4.16. Biyogaz destekli, SOEC elektrolizörü entegre edilen sistemde her noktanın termodinamik özellikleri

Nokta	\dot{m} (kg/s)	T (K)	P (kPa)	\dot{E} (kW)	\dot{E}_x (kW)
1	1,64	298,15	101,325	490,74	0
2	1,64	343,30	151,98	565,90	3430,791
3	0,09	313,15	-	60,20	118,12
4	1,72	1153,51	303,96	2216,09	1010,29
5	1,72	1117,89	307,0	2139,79	958,72
6	1,72	689,17	132,21	1260,78	255,73
7	1,72	457,91	130,90	854,69	66,92
8	1,72	373,15	129,6	665,81	15,04
9	0,00016	283,15	101,325	0,071	0,0007
10	0,00014	383,15	101,325	0,022	0,003
11	0,00036	698,84	101,325	0,283	0,11
12	0,00036	1023	101,325	0,62	1,417
13	0,00012	1123	101,325	0,134	0,33
14	0,000015	1123	101,325	0,25	0,46
	0,00023	1123	101,325	0,39	1,11
15	0,000015	1123	101,325	0,25	0,10
16	0,00022	1123	101,325	0,39	0,208
17	3,98	318,15	35	750,02	10,67
18	3,98	318,45	90	750,29	6,25
19	3,98	353,15	81	1333,31	75,47

Tablo 4.17. Biyogaz destekli, SOEC elektrolizörü entegre edilen sistemde her bileşenin enerji ve ekserji analizi sonuçları

Bileşen	\dot{Q} (kW)	\dot{W} (kW)	$\dot{E}x_Q$ (kW)	$\dot{E}x_W$ (kW)	$\dot{E}x_d$ (kW)	η (%)	ϵ (%)
AC	-	70,05	-	70,05	65,52	93,3	96,46
CC	1173,29	-	870,03	-	999,56	71,74	71,84
GT	-	913,33	-	913,33	80,04	78,71	92,79
HE-I	1,75	-	0,42	-	59,36	99,81	99,10
SOEC	-	33,70	-	33,70	32,62	74,86	83,78
HE-II	1,05	-	0,37	-	48,75	97,37	95,29
P	-	0,36	-	0,36	5,04	99,92	97,25
Tüm sistem						59,31	70,28

Tablo 4.17’de görüldüğü gibi sistemin genel enerji ve ekserji verimi sırasıyla %59,31 ve %70,28 olarak belirlenmiştir. NBD analiz sonuçları Tablo 4.18’de verilmiştir.

Tablo 4.18. Biyogaz destekli, SOEC elektrolizörü entegre edilen sistemin NBD analizi sonuçları

Yatırım	Bugün	5	10	15	20
Brayton çevrimi maliyeti	-4.816.825,78				
Çürütme alanı maliyeti	-1.149.979,05				
SOEC ünitesi maliyeti	-30.687,10				
TED maliyeti	-12.398,31				
Toplam maliyet	-6.009.890,23				
Hurda maliyeti	-600.989,02				
İlk yatırım maliyeti	-5.408.901,21				
Nakit akışı (US\$)					
Bakım onarım maliyeti	-811.335,76	-40.566,76	-40.566,76	-40.566,76	-40.566,76
Personel giderleri	-92.211,79	-92.211,79	-92.211,79	-92.211,79	-92.211,79
Elektrik üretimi	775.227,13	775.227,13	775.227,13	775.227,13	775.227,13
Hidrojen kazancı	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
Biyokütle bertarafı	399.529,0	399.529,0	399.529,0	399.529,0	399.529,0
Atık ısı kazancı	36.714,09	36.714,09	36.714,09	36.714,09	36.714,09
Toplam nakit akışı	-5.408.901,21	1.078.692,35	1.078.692,35	1.078.692,35	1.078.692,35
Kümülatif nakit akışı	-5.408.901,21	-15.439,48	5.378.022,25	10.771.483,98	16.164.945,71
İskonto oranı (%13)	1	0,54	0,29	0,16	0,09
Bugünkü Değer	-5.408.901,21	-8.379,93	1.431.181,72	1.722.260,68	1.402.831,09
NBD (US\$)			8.059.517,39		

Tablo 4.18’de görüldüğü gibi, Brayton çevrimi maliyeti, ilk yatırım maliyetinin en büyük payını oluşturmaktadır; bunu biyokütle sindirim alanı, SOEC ünitesi ve TED sistemi maliyetleri takip edmektedir. Ekonomik analiz sonuçları sistemin 7. yıldan itibaren karlı hale geldiğini ve 20 yıllık işletme ömrü sonunda toplam 8,05 milyon US\$ kar elde edilebileceğini göstermektedir.

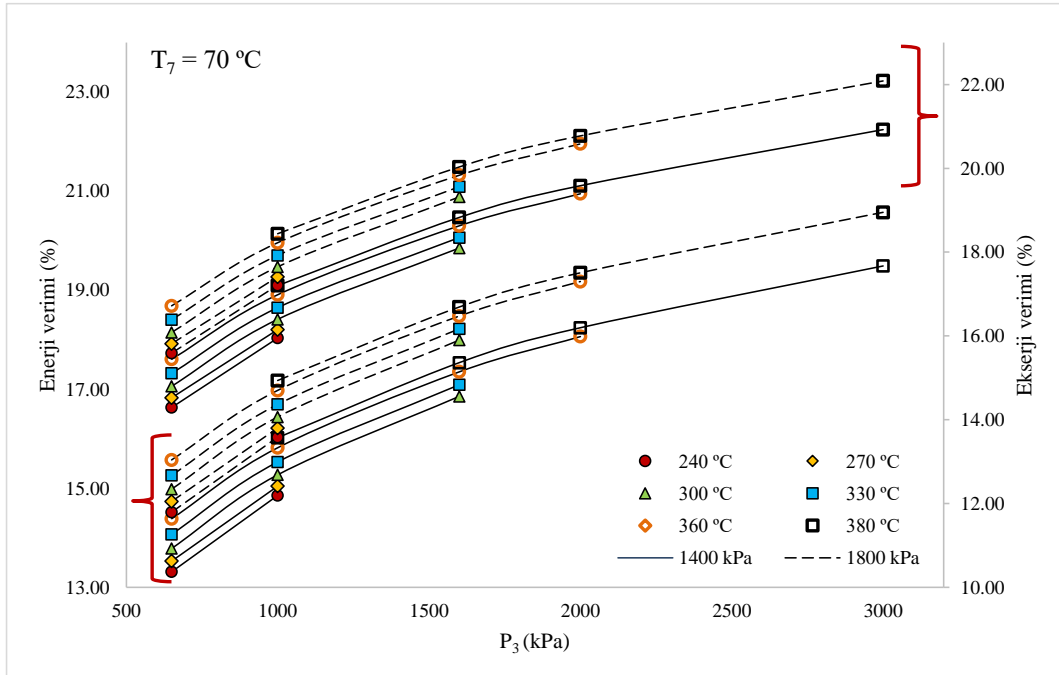
4.5.Güneş Enerjisi ve Biyogaz Destekli Multijenerasyon Çevrimi

Yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımını hedefleyen, güneş enerjisi ve biyogaz tabanlı bir multijenerasyon sistemi geliştirilmiştir. Önerilen çalışma iki ana aşamada

değerlendirilmiştir. İlk aşama, güneş alanı, termal enerji depolama sistemi ve güç bloğunu içeren güneş enerjisi destekli iki kademeli güç çevrimini kapsamaktadır. Bu bölümde sistem, farklı çalışma parametreleri altında termodinamik ve ekonomik açıdan değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, güç üretimi, enerji verimi ve ekserji verimi bakımından en uygun sistem parametreleri belirlenmiş ve “Durum I” olarak adlandırılmıştır. İlk yatırım maliyeti açısından en uygun parametreleri ise “Durum II” olarak tanımlanmıştır.

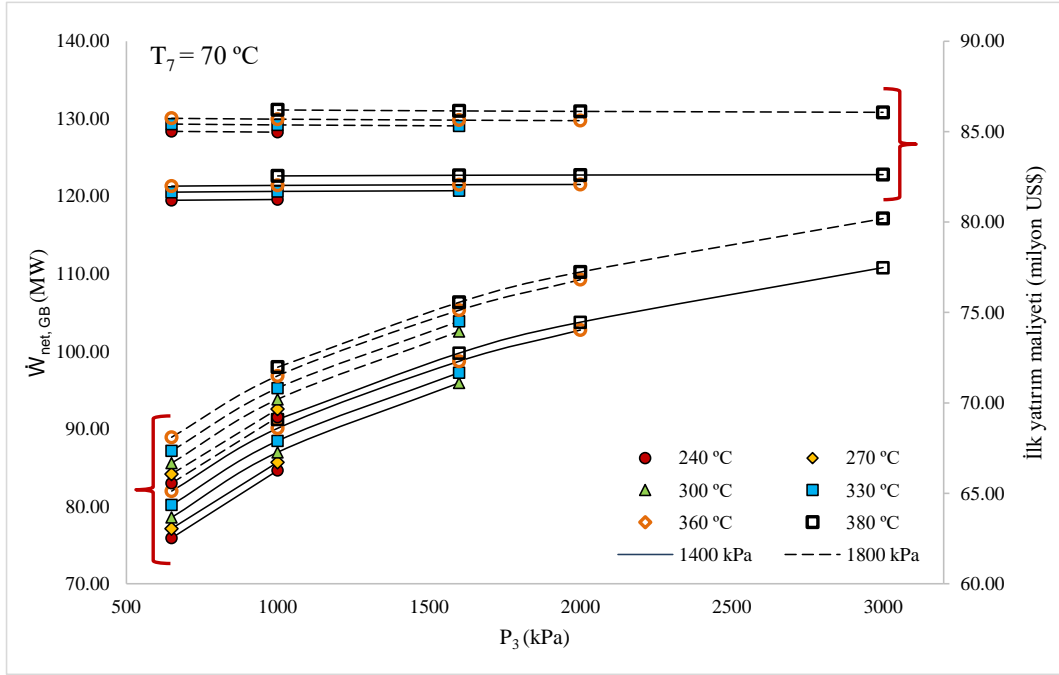
Çalışmanın ikinci aşaması, güneş enerjisi destekli iki kademeli güç çevrimi, SOEC ünitesi, biyogaz üretim alanı, Brayton çevrimi ve atık ısı depolama alanını içeren multijenerasyon sistemidir. Bu aşamada, birinci aşamada belirlenen Durum I ve Durum II parametreleri esas alınarak sistem; SOEC çalışma sıcaklığı, akım yoğunluğu, kompresör sıkıştırma oranı ve hava nemi gibi ilave parametreler dikkate alınarak yeniden termodinamik ve ekonomik açıdan analiz edilmiştir.

Güneş enerjisi santrali, Buharlı Rankine Çevrimi için T_3 ve P_3 , Organik Rankine Çevrimi için ise P_7 parametreleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Bu parametreler için belirlenen değer aralıkları sırasıyla T_3 : 240–380 °C, P_3 : 650–3000 kPa ve P_7 : 1400–1800 kPa’dır. Farklı çalışma parametreleri altında sistemin enerji ve ekserji verimindeki değişim Şekil 4.23’de, güç üretimi ile ilk yatırım maliyetindeki değişimler ise Şekil 4.24’de sunulmuştur.



Şekil 4.23. Güneş enerjisi destekli iki kademeli güç çevriminin enerji ve ekserji verimi

Şekil 4.23 incelendiğinde, sistemin enerji ve ekserji verimlerinin hem buhar türbini giriş sıcaklığı (T_3) hem de basıncındaki (P_3 , P_7) artışla önemli ölçüde bir iyileşme gösterdiği görülmektedir. Düşük sıcaklık ve basınç koşullarında ($T_3 = 240$ °C, $P_3 = 650$ kPa, $P_7 = 1400$ kPa) enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %13,31 ve %14,29 olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, yüksek sıcaklık ve basınç değerlerinde ($T_3 = 380$ °C, $P_3 = 3000$ kPa, $P_7 = 1800$ kPa) enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %20,57 ve %22,09 seviyelerine ulaşarak sistem performansında önemli bir artış sağlamıştır.

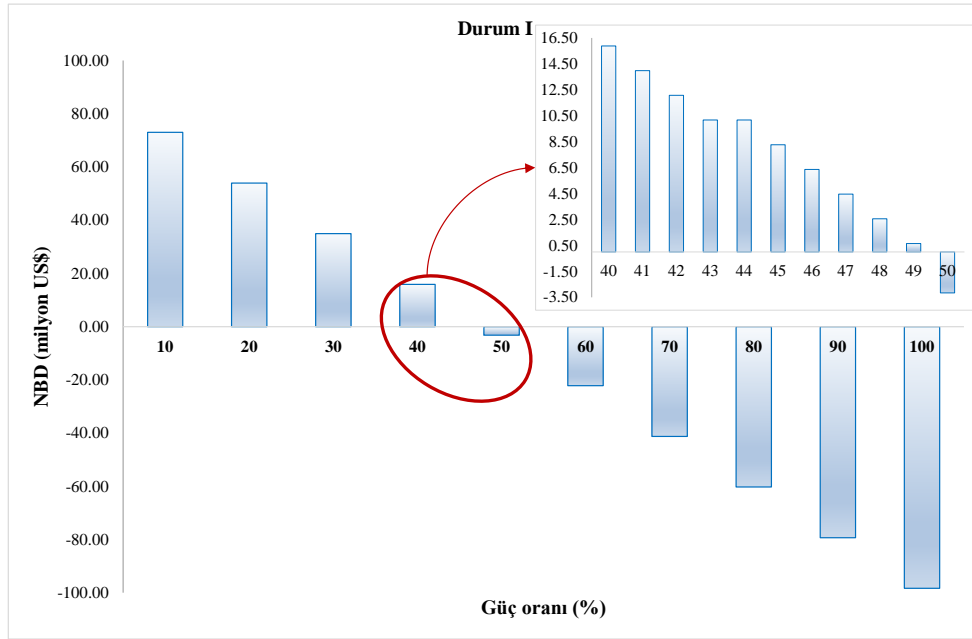


Şekil 4.24. Güneş enerjisi destekli iki kademeli güç çevriminin net güç üretimi ve ilk yatırım maliyeti

Şekil 4.24 incelendiğinde, net güç üretiminin T_3 , P_3 ve P_7 değerlerindeki artışa bağlı olarak yükseldiği görülmektedir. En düşük güç üretimi, $T_3 = 240$ °C, $P_3 = 650$ kPa ve $P_7 = 1400$ kPa koşullarında 75,91 MW olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en yüksek güç üretimi $T_3 = 380$ °C, $P_3 = 3000$ kPa ve $P_7 = 1800$ kPa koşullarında 117,12 MW'a ulaşmıştır. İlk yatırım maliyeti açısından değerlendirildiğinde, farklı parametre kombinasyonları arasında sınırlı bir azalma gözlenmiş; ilk yatırım maliyeti 81 milyon US\$ ile 86 milyon US\$ aralığında değişmektedir. Maliyetlerdeki bu sınırlı değişim, incelenen parametre aralıklarının sistemin ana donanım boyutlandırmasını önemli ölçüde değiştirmemesine bağlanabilir. Buna göre, “Durum I” olarak tanımlanan ve termodinamik açıdan en uygun performansı sağlayan sistem parametreleri; $T_3 = 380$ °C, $P_3 = 3000$ kPa, $T_7 = 70$ °C ve $P_7 = 1800$ kPa olarak belirlenmiştir. “Durum II” ise en düşük ilk yatırım maliyetinin esas alındığı parametre kombinasyonunu ifade

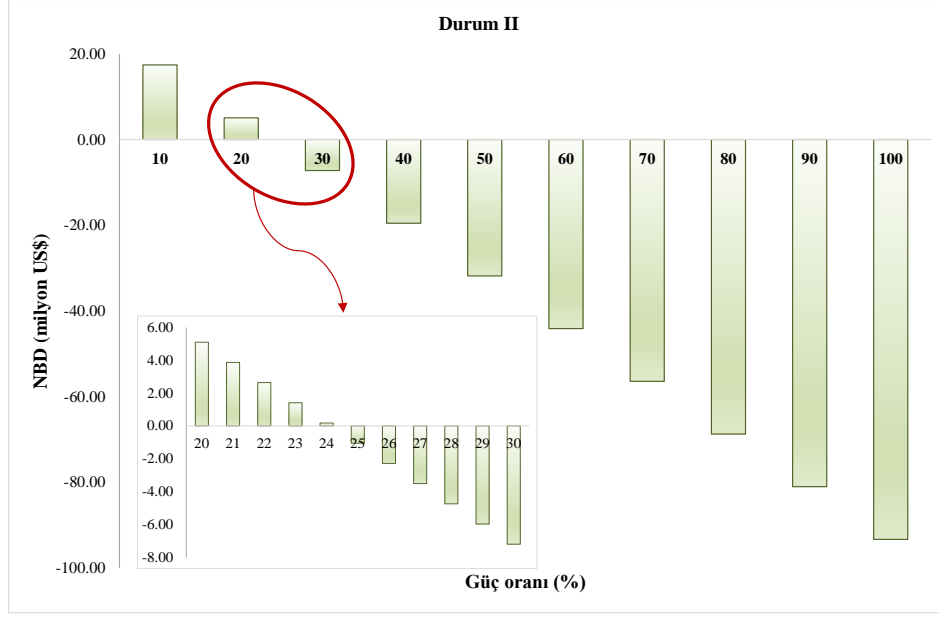
etmekte olup, bu durumda $T_3 = 240 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_3 = 650 \text{ kPa}$, $T_7 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $P_7 = 1400 \text{ kPa}$ değerleri belirlenmiştir.

Belirlenen Durum I ve Durum II, multijenerasyon çevriminin temel çalışma senaryolarını oluşturmaktadır. evrimde SOEC nitesinin çalıştırılması için gerekli güç güneş enerjili g santralinden sağlanır. Bu bağlamda, güneş enerjili g çevriminden elde edilen gücün SOEC nitesine tahsis edilen kısmını ifade eden bir g kullanım oranı belirlenmiştir. Teorik olarak üretilen elektrik enerjisinin tamamının hidrojen üretimi için kullanılması durumunda, hidrojen üretimi maksimum seviyede olacaktır. Fakat sistem analizinde göz önüne alınması gereken tek parametre hidrojen üretimi değil aynı zamanda sistemden elde edilecek karda önemlidir. Bu nedenle g kullanım oranı belirlenirken hem karlı bir sistem hem de üretilebilecek maksimum hidrojen miktarı hedeflenmiştir. Durum I ve Durum II için belirlenen g kullanım oranları sırasıyla Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da verilmiştir.



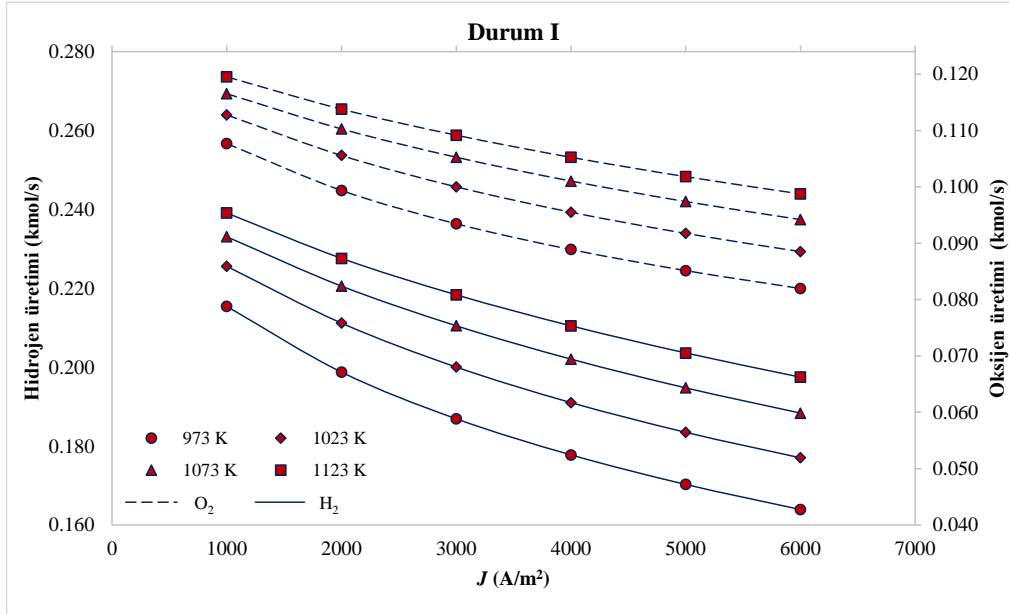
Şekil 4.25. Durum I için NBD’nin g kullanım oranına göre değişimi

Şekil 4.25 incelendiğinde, g kullanım oranının %10’dan %100’e artırılmasıyla birlikte sistemden elde edilebilecek net krın azaldığı ve belirli bir noktadan sonra yatırımın ekonomik olarak sürdürülebilirliğini yitirdiği görülmektedir. Durum I için özellikle g kullanım oranı %40–%50 aralığında incelendiğinde, %49’un üzerinde sistemin artık karlı bir yatırım olmaktan çıktığı belirlenmiştir. Bu nokta, aynı zamanda hidrojen üretim kapasitesinin ulaşabileceği en yüksek seviyeyi temsil etmektedir.



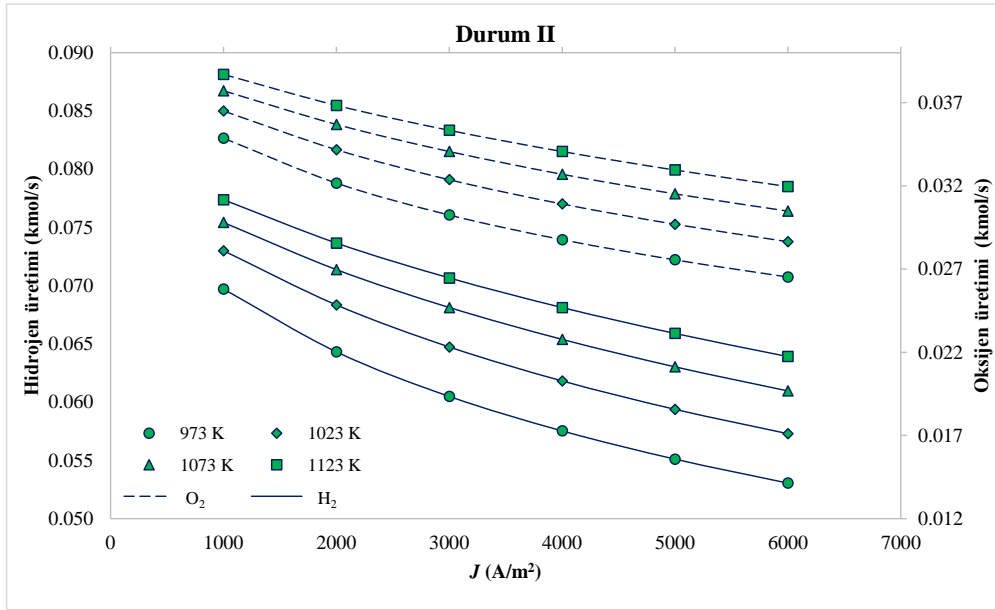
Şekil 4.26. Durum II için NBD'nin güç kullanım oranının göre değişimi

Şekil 4.26 incelendiğinde, güç kullanım oranı %30'un üstüne çıktığında sistemden elde edilebilecek karın azaldığı belirlenmiştir. Buna göre %20 ile %30 arası ayrıntılı olarak incelendiğinde güç kullanım oranı %24'den sonra sistem artık karlı bir yatırım olmaktan çıkmaktadır. Bu nokta aynı zamanda durum II şartları göz önüne alındığında hidrojen üretim miktarının en yüksek olduğu değerdir. Belirlenen güç kullanım oranlarına göre SOEC ünitesinden elde edilebilecek hidrojen ve oksijen miktarlarının J ve T_{SOEC} 'e bağlı olarak değişimi Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de verilmiştir.



Şekil 4.27. Durum I şartlarında akım yoğunluğu ve T_{SOEC} sıcaklığına göre hidrojen ve oksijen üretimi

Şekil 4.27 incelendiğinde, Durum I koşullarında %49 güç kullanım oranında hidrojen ve oksijen üretim miktarlarının J arttıkça azaldığı, T_{SOEC} arttıkça ise yükseldiği görülmektedir. Analizler sonucunda, en düşük hidrojen ve oksijen üretim miktarları, $J = 6000 \text{ A/m}^2$ ve $T_{SOEC} = 973 \text{ K}$ koşullarında sırasıyla $0,164 \text{ kmol/s}$ ve $0,082 \text{ kmol/s}$ olarak elde edilmiştir. En yüksek hidrojen ve oksijen üretim miktarları ise $J = 1000 \text{ A/m}^2$ ve $T_{SOEC} = 1123 \text{ K}$ koşullarında sırasıyla $0,240 \text{ kmol/s}$ ve $0,120 \text{ kmol/s}$ dır.



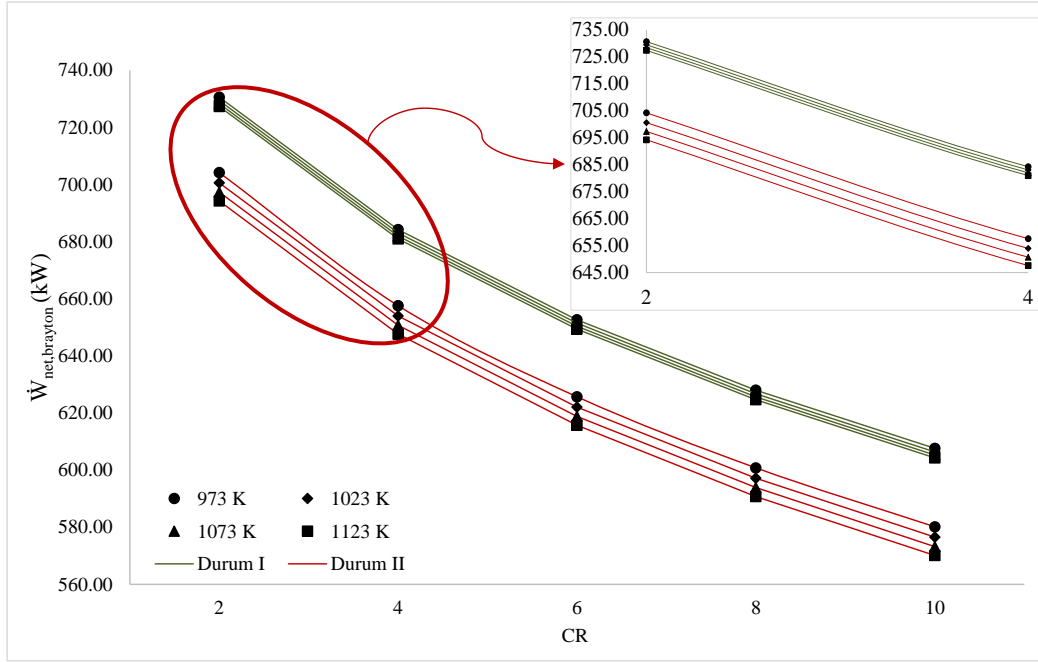
Şekil 4.28. Durum II şartlarında akım yoğunluğu ve T_{SOEC} sıcaklığına göre hidrojen ve oksijen üretimi

Şekil 4.28 incelendiğinde, Durum II koşullarında %24 güç kullanım oranında hidrojen ve oksijen üretim miktarlarının J arttıkça azaldığı, T_{SOEC} arttıkça ise yükseldiği görülmektedir. Analizler sonucunda, en düşük hidrojen ve oksijen üretim miktarları, $J = 6000 \text{ A/m}^2$ ve $T_{SOEC} = 973 \text{ K}$ koşullarında sırasıyla $0,053 \text{ kmol/s}$ ve $0,027 \text{ kmol/s}$ olarak elde edilmiştir. En yüksek hidrojen ve oksijen üretim miktarları ise $J = 1000 \text{ A/m}^2$ ve $T_{SOEC} = 1123 \text{ K}$ koşullarında sırasıyla $0,077 \text{ kmol/s}$ ve $0,039 \text{ kmol/s}$ dır.

Sonuç olarak J ve T_{SOEC} açısından incelendiğinde, J 'nin artmasıyla elektrotlarda meydana gelen ohmic kayıpların arttığı ve bunun sonucunda hidrojen ve oksijen üretim miktarının azaldığı görülmektedir. Buna karşılık T_{SOEC} artması reaksiyon sürecini hızlandırdığından hidrojen ve oksijen üretiminde artış gözlemlenmiştir.

SOEC ünitesinde üretilen oksijen, yanmayı iyileştirmek için yanma odasına beslenir. Bu bağlamda, Brayton çevrimi de farklı parametre değerlerinde incelendi. Her iki durum içinde en yüksek oksijen üretimi J 'nin 1000 A/m^2 olduğu koşullarda elde edilmişti. Bu doğrultuda,

CR 'ye bağılı olarak oksijen sıcaklığındaki değişimin Brayton çevriminin net güç üretimi ($\dot{W}_{net,brayton}$) üzerindeki etkisi, Durum I ve Durum II koşulları için Şekil 4.29'da verilmiştir.

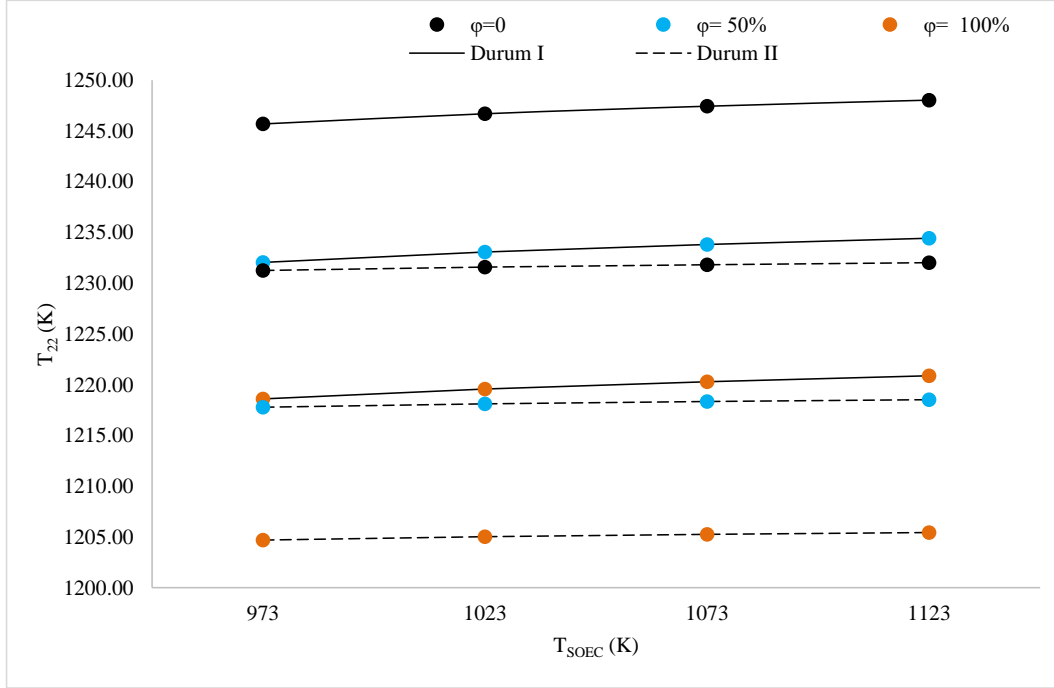


Şekil 4.29. CR ve T_{SOEC} 'in farklı parametrelerine göre $\dot{W}_{net,brayton}$ 'nın değişimi

Şekil 4.29 incelendiğinde, her iki durumda da hava kompresörünün CR 'si arttıkça Brayton çevriminin net güç üretiminin azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın temel nedeni, CR 'deki artışın kompresörü çalıştırmak için gerekli gücü artırmasıdır. Bu durum, türbinden elde edilen net gücün önemli bir kısmının kompresörün enerji ihtiyacını karşılamak için harcanmasına yol açmaktadır. T_{SOEC} açısından değerlendirildiğinde ise, sıcaklık arttıkça net güç üretiminde düşüş gözlenmiştir. Bunun nedeni, SOEC ünitesinin ihtiyaç duyduğu ısının Brayton çevrimindeki ısı değiştirici aracılığıyla sağlanmasıdır. Çalışma sıcaklığının yükselmesi, SOEC için gerekli ısı talebini artırarak ısı değiştiricide daha fazla enerji çekilmesine neden olur. Bu ilave ısı talebi, türbin girişinde mevcut olan enerjiyi azaltmakta ve dolayısıyla net güç üretiminde düşüşe yol açmaktadır.

En düşük net güç üretimi, $CR = 10$ ve $T_{SOEC} = 1123$ K olduğu koşullarda elde edilmiştir. Bu durumda, Durum I ve Durum II için net güç üretimi sırasıyla 604,24 kW ve 570,05 kW olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık, en yüksek net güç üretimi, $CR = 2$ ve $T_{SOEC} = 973$ K koşullarında gerçekleşmiş olup, Durum I için 730,58 kW, Durum II için ise 704,18 kW olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, düşük CR ve nispeten düşük T_{SOEC} 'in Brayton çevriminin net iş üretim kapasitesini artırdığını, buna karşılık yüksek CR ve yüksek T_{SOEC} 'in net güç üretiminde

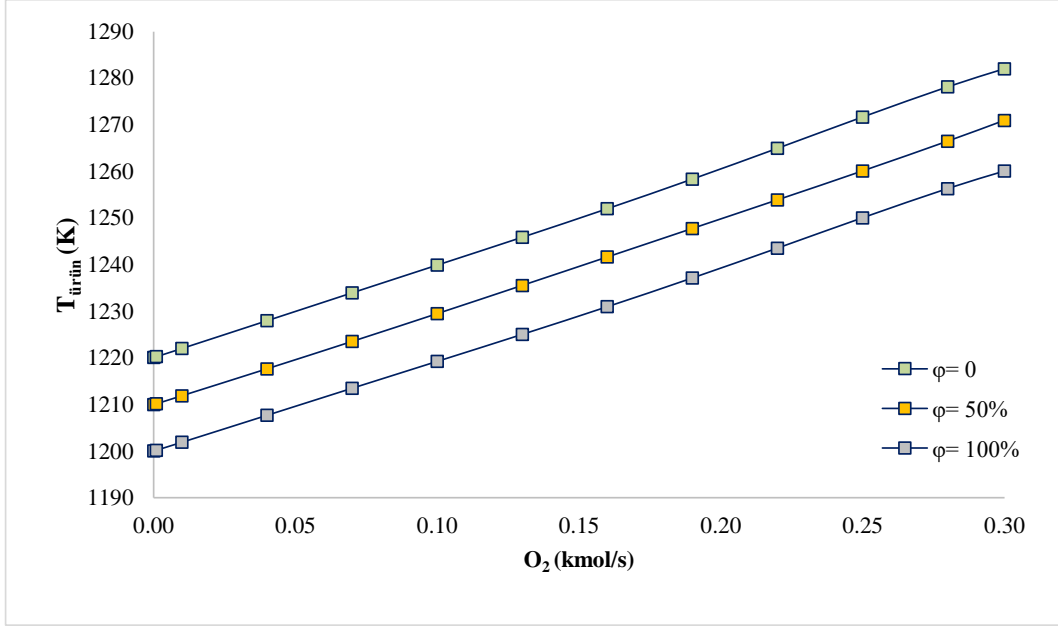
olumsuz bir etki yarattığını ortaya koymaktadır. Buna göre CR 'nin 2 olduğu şartlarda φ 'nin değişiminin yanma sonu ürün sıcaklığı (T_{22})'na etkisi Şekil 5.30'da verilmiştir.



Şekil 4.30. Havadaki nemin yanma sonu sıcaklığına etkisi

Şekil 4.30 incelendiğinde T_{SOEC} 'deki değişimin T_{22} 'yi az miktarda arttırdığı belirlenmiştir. φ 'daki değişim açısından incelendiğinde ise gözle görülür oranda bir fark dikkat çekmektedir. Hem Durum I hem de Durum II için bakıldığında φ arttıkça T_{22} 'nin azaldığı belirlenmiştir. Durum I için %100 nemli hava şartlarında yanma sonu ürün sıcaklığı 1220,87 K iken, nemsiz hava şartlarında bu değer 1248,03K olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, Durum II için %100 nemli hava şartlarında 1205,43 K olan sıcaklık, nemsiz hava şartlarında 1231,01 K olarak belirlendi. Ilıman iklim kuşağına sahip bölgelerde havanın nemi %40-60 arasındadır (MGM, 2025). Bundan dolayı bu çalışmada %50 nemli hava şartları göz önüne alınmıştır. Buna göre %50 nemli havada Durum I ve Durum II için T_{SOEC} sırasıyla, 1234.42 K ve 1218.53 K olarak belirlendi.

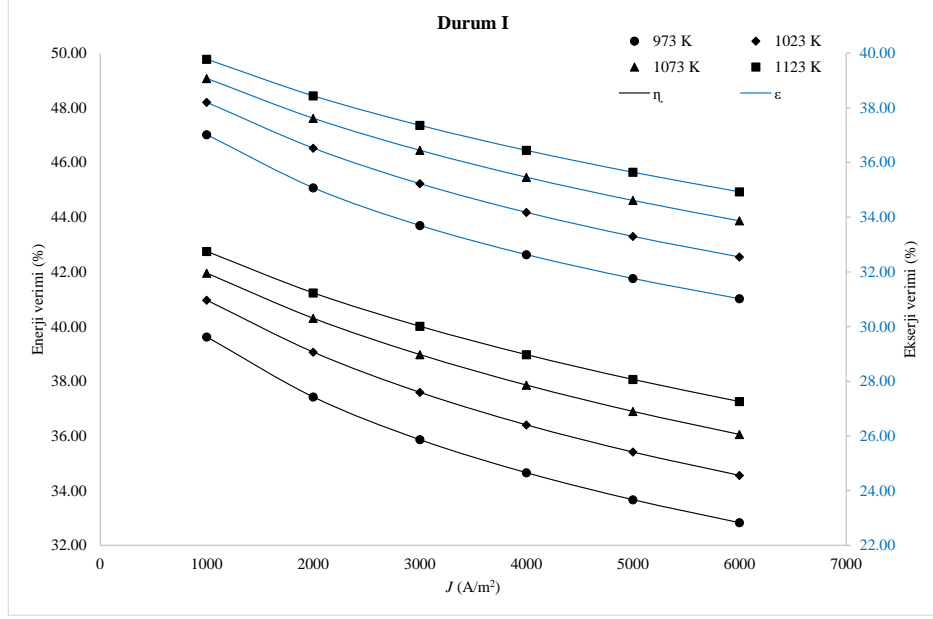
Yanma odasına ilave edilen oksijen miktarının yanma sonu ürün sıcaklığı ($T_{ürün}$) üzerindeki etkisi, daha net bir biçimde Şekil 4.31'de sunulmaktadır. Şekilde, farklı nem oranlarına sahip hava koşullarında yanma havasına eklenen oksijenin, $T_{ürün}$ 'ne olan etkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.31. Oksijenle zenginleştirilen havanın $T_{ürün}$ üzerindeki etkisi

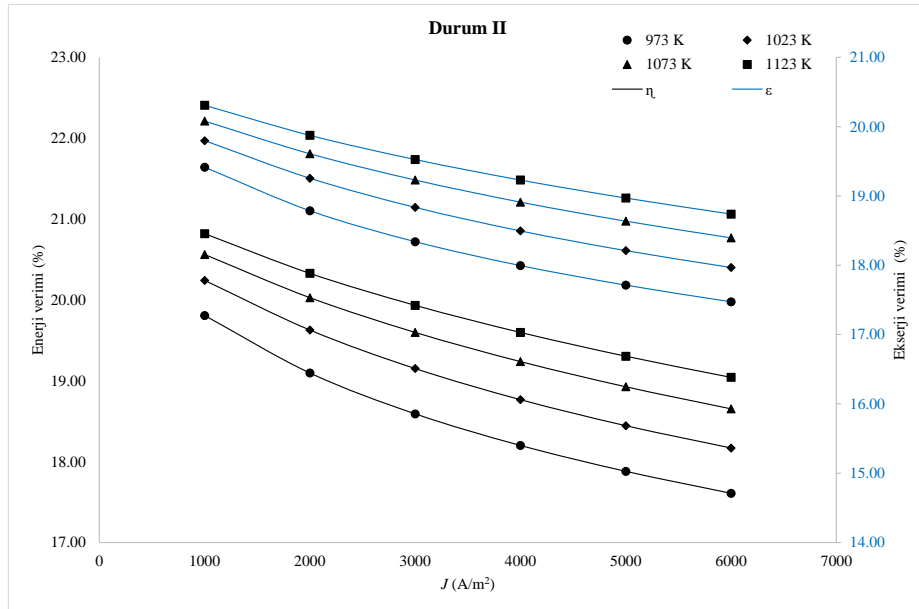
Şekil 4.31 incelendiğinde, yanma odasına ilave edilen oksijen miktarının artmasıyla $T_{ürün}$ 'nin yükseldiği görülmektedir. Analiz sonuçları, hiç oksijen ilavesi yapılmayan durumda elde edilen $T_{ürün}$ ile 0,3 kmol/s oksijenle zenginleştirilmiş durumda elde edilen sıcaklık arasında yaklaşık 50 °C'lik bir artış sağlanabildiğini göstermektedir. Ayrıca şekilde görüldüğü gibi yanma havasını etkileyen bir diğer önemli parametre nemli havadır. En iyi şartlarda 0,3 kmol/s oksijen ilavesi ve nemsiz hava şartlarında $T_{ürün}$ 1282 K'ne ulaşırken, %100 nemli havada bu sıcaklık 1260 K sıcaklığa düşmektedir.

Multijenerasyon sisteminin, Durum I ve Durum II için $\varphi = \%50$ ve $CR = 2$ olduğu koşullarda, J ve T_{SOEC} bağlı olarak enerji verimi ve ekserji verimi değerlendirilmesi Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'de verilmiştir.



Şekil 4.32. Durum I şartlarında multijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji verimi değerlendirilmesi

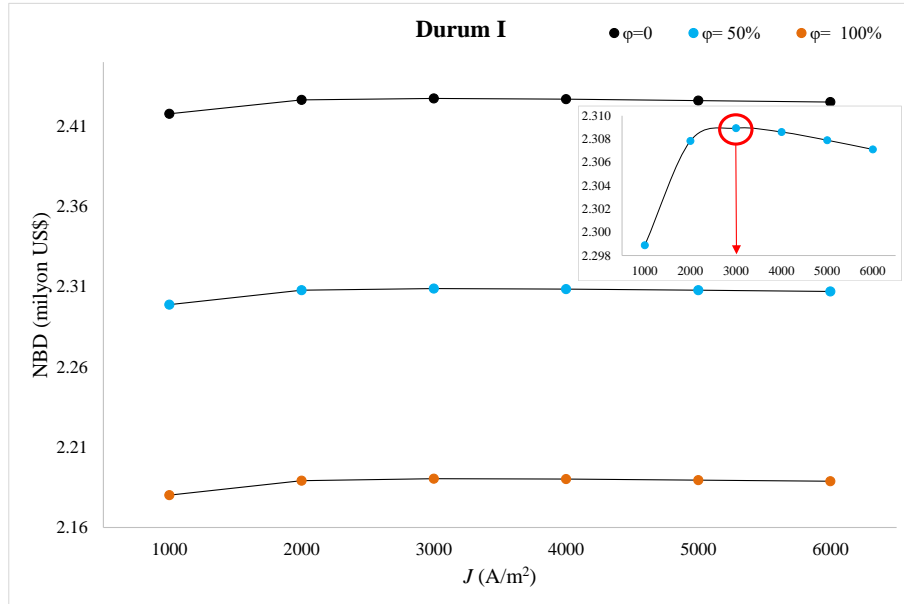
Şekil 4.32 incelendiğinde J 'ye bağlı olarak enerji ve ekserji veriminin azaldığı, T_{SOEC} 'e bağlı olarak ise arttığı belirlenmiştir. Durum I şartlarında en düşük enerji ve ekserji verim $J = 6000 \text{ A/m}^2$ ve $T_{SOEC} = 973 \text{ K}$ olduğu durumda %32,83 ve %31,02 olarak belirlendi. En yüksek enerji ve ekserji verimi ise $J = 1000 \text{ A/m}^2$ ve $T_{SOEC} = 1123 \text{ K}$ olduğu durumda %42,75 ve %39,78 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.33. Durum II şartlarında multijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji verimi değerlendirilmesi

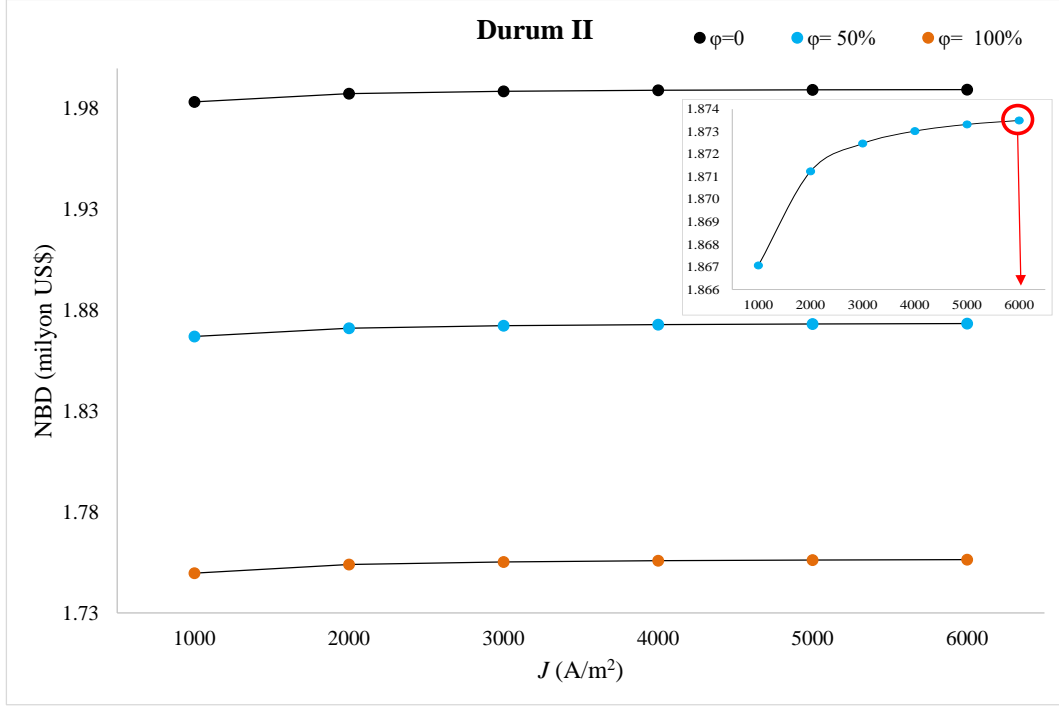
Şekil 4.33 incelendiğinde J 'ye bağlı olarak enerji ve ekserji veriminin azaldığı, T_{SOEC} 'e bağlı olarak ise arttığı belirlenmiştir. Durum II şartlarında en düşük enerji ve ekserji verimi $J = 6000 \text{ A/m}^2$ ve $T_{SOEC} = 973 \text{ K}$ olduğu durumda %17,61 ve %17,47 olarak belirlendi. En yüksek enerji ve ekserji verimi ise $J = 1000 \text{ A/m}^2$ ve $T_{SOEC} = 1123 \text{ K}$ olduğu durumda %20,82 ve %22,31 olarak belirlenmiştir.

Güç üretimi ve verim açısından değerlendirilen sistem bir diğer önemli parametre olan ekonomik açıdan da değerlendirildi. Sistemin ekonomik analizinde φ ve J değerleri göz önüne alındı. Sistemden maksimum verim 1123 K sıcaklıkta elde edilmiş olsa da en yüksek güç üretimi 973 K'de elde edilmiştir. Bundan dolayı en yüksek güç üretiminin sağlandığı $CR = 2$ ve $T_{SOEC} = 973 \text{ K}$ olduğu durumlarda sistemin NBD analizi değerlendirildi. Durum I ve Durum II için maliyet analizi değerlendirmesi Şekil 4.34 ve Şekil 4.35 de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.34. Durum I şartlarında akım yoğunluğu ve neme bağlı olarak multijenerasyon sisteminin NBD analizi

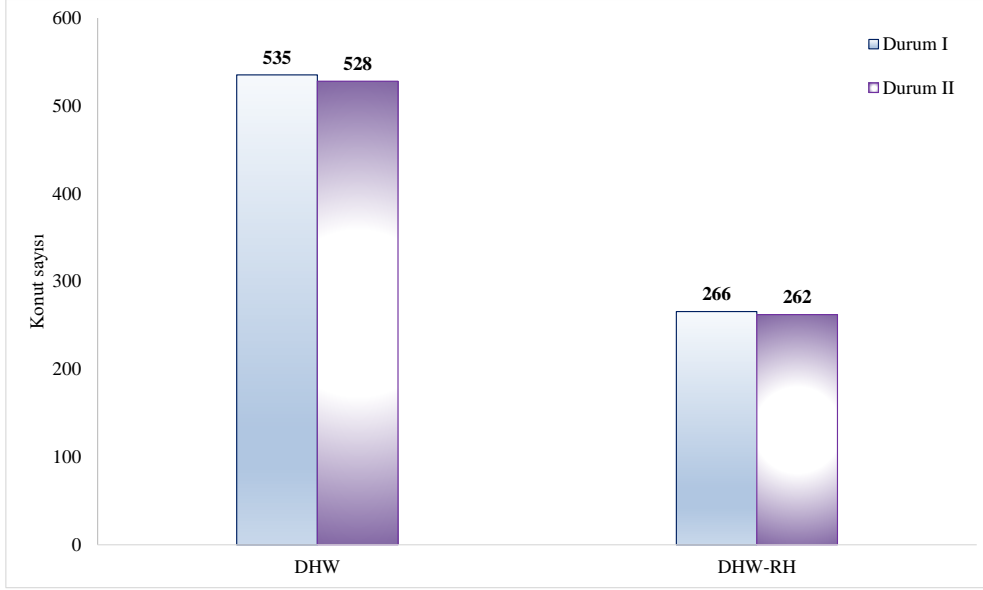
Şekil 4.34 incelendiğinde havanın nem oranındaki değişimin maliyet üzerinde gözle görülür bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. J açısından bakıldığında bu değişim nispeten daha düşüktür. %50 nemli hava şartlarında en düşük NBD, 1000 A/m^2 'de 2,29 milyon US\$ olarak belirlenmiştir. J arttıkça NBD'nin arttığı fakat bir noktadan sonra azalmaya başladığı belirlenmiştir. Optimum noktayı ifade eden bu değer 3000 A/m^2 değerinde 2,308 milyon US\$'dir.



Şekil 4.35. Durum II şartlarında kım yoğunluğu ve neme bağlı olarak multijenerasyon sisteminin NBD analizi

Şekil 5.35 incelendiğinde havanın nem oranındaki değişimin maliyet üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. J açısından bakıldığında bu değişim nispeten daha düşüktür. %50 nemli hava şartlarında en düşük NBD, 1000 A/m^2 'de 1,86 milyon US\$ olarak belirlenmiştir. J 'nin artışıyla birlikte NBD'de eğrisinde bir yükseliş eğilimi gözlenmiş ve Durum II için optimum noktanın 6000 A/m^2 akım yoğunluğunda oluştuğu belirlenmiştir. Bu koşullarda elde edilen en yüksek NBD = 1,873 milyon US\$'dır.

Parametrik değerlendirmeler sonucunda multijenerasyon sisteminin Durum I ve Durum II koşullarında optimum çalışma parametreleri belirlenmiştir. Buna göre φ , CR , T_{SOEC} ve J değerleri; Durum I için %50, 2, 973 K ve 3000 A/m^2 , Durum II için %50, 2, 973 K ve 6000 A/m^2 olarak tespit edilmiştir. Bu çalışma koşullarında TED'de depolanan ısının mevsimsel kullanım için uygun olduğu görülmüştür. Belirlenen parametre değerleri altında, Durum I ve Durum II için sırasıyla $10066,72 \text{ MJ/gün}$ ve $9930,39 \text{ MJ/gün}$ ısı depolamak mümkündür. Bu ısının konutlarda kullanım sıcak suyu (DHW) ve konut ısıtması (RH) ihtiyacının karşılanmasına yönelik değerlendirmesi Şekil 4.36 'da verilmiştir.



Şekil 4.36. Atık ısının mevsimsel kullanım açısından değerlendirilmesi

Şekil 4.36 incelendiğinde Durum I ve Durum II şartlarında yaz aylarında kullanıma uygun olarak sırasıyla 535 ve 528 konutun DHW ihtiyacının karşılanabildiği, kış aylarında ise sırasıyla 266 ve 262 konutun hem DHW hem de RH ihtiyacının karşılanabildiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde hem termodinamik hem de ekonomik açıdan Durum-I şartlarındaki sistemin daha üstün özellikler gösterdiği görülmektedir. Buna göre Durum I şartlarındaki multijenerasyon sisteminin optimum çalışma koşulları altında her bir noktadaki termodinamik özellikleri Tablo 4.19’da verilmiştir.

Tablo 4.19. Multijenerasyon sisteminin her bir noktasındaki termodinamik özellikler

Nokta	Akışkan	\dot{m} kg/s kmol/kg	T K	P kPa	h kJ/kg kJ/kmol	s kJ/kgK kJ/kmolK
1	R718	131,99	354,47	50	340,54	1,091
2	R718	131,99	354,5	3000	343,57	1,091
3	R718	131,99	653,15	3000	3.185,87	6,854
4	R718	131,99	354,47	50	2.503,75	6,854
5	R152a	1.024,4	313,18	910	271,41	1,2413
6	R152a	1.024,4	313,5	1800	272,44	1,2413
7	R152a	1.024,4	343,15	1800	545,58	2,048
8	R152a	1.024,4	313,18	910	527,48	2,048
9	Hava	25.045,75	302,95	101,325	429,3	3,893
10	Hava	25.045,75	313,15	101,325	439,542	3,9276
11	Therminol VP-I	936,72	393,15	23	181,30	0,54
12	Therminol VP-I	318,5	673,15	23	800,50	1,71
12'	Therminol VP-I	618,23	673,15	23	800,50	1,71
13	Therminol VP-I	318,5	393,15	15	181,30	0,54
13'	Therminol VP-I	618,23	393,15	15	181,30	0,54
14	Eriyik tuz	417,3	663,15	50	483,06	-
15	Eriyik tuz	257,27	661,37	-	480,11	-
16	Eriyik tuz	257,27	661,4	-	480,11	-
17	Eriyik tuz	257,27	385,94	-	22,90	-
18	Eriyik tuz	417,3	384,15	-	19,92	-
19	Hava	-	302,95	101,325	303,179	1,712
20	Hava	-	380,28	202,65	381,02	1,941
21	Biyogaz	-	313,15	-	-	-
22	Gaz akışkan	-	1229,22	-	-	-
23	Gaz akışkan	-	1198,7	-	-	-
24	Gaz akışkan	-	703,94	-	-	-
25	Gaz akışkan	-	690,51	-	-	-
26	Gaz akışkan	-	373,15	-	-	-
27	H ₂ O	0,187	283,15	101,325	-499,73	187,08
28	H ₂ O	0,187	383,15	101,325	2.873,08	197,14
29	H ₂ O	0,498	631,40	101,325	11.642,27	214,82
30	H ₂ O	0,498	973	101,325	12.397,31	231,44
31	O ₂	0,093	973	101,325	30.443,74	242,50
32	H ₂ O	0,311	973	101,325	24.873,07	231,44
	H ₂	0,187	973	101,325	28.858,67	149,21
33	H ₂	0,187	973	101,325	28.858,67	149,21
34	H ₂ O	0,311	973	101,325	24.873,07	231,44
35	H ₂ O	3,84	318,15	35	188,45	0,639
36	H ₂ O	3,84	318,45	90	188,52	0,643
37	H ₂ O	3,84	353,15	81	355,01	1,076

Termodinamik özellikleri verilen multijenerasyon sisteminin her bir bileşenine ait enerji ve ekserji analizi sonuçları Tablo 4.20'de verilmiştir.

Tablo 4.20. Multijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji analizi sonuçları

Bileşen	$\dot{E}_{k\ddot{u}tle,g}$ kW	$\dot{E}_{k\ddot{u}tle,\zeta}$ kW	\dot{Q} kW	\dot{W} kW	$\dot{E}x_{k\ddot{u}tle,g}$ kW	$\dot{E}x_{k\ddot{u}tle,\zeta}$ kW	$\dot{E}x_Q$ kW	$\dot{E}x_W$ kW	$\dot{E}x_d$ kW	η %	ε %
PTSC	169.728,2	254.946,9	643.506,1	542,12	19.288,19	92.949,78	640.475,6	542,12	567.356,13	81	86
HE-I	197.205,7	193.261,7	3.944,1	-	100.180,1	93.572,12	2.197,19	-	8.805,15	98	91
HE-II	117.628,7*	115.276,1*	2.352,57*	-	124.444,5*	51.723,16*	1.292,026*	-	74.013,34*	98*	81*
HE-III	382.810,9	375.154,8	7.656,22	-	183.441	162.698,5	4.265,14	-	25.007,61	98	86
HE-IV	285.522,2	279.811,8	5.710,44	-	127.365,7	101.847,7	907,26	-	26.425,24	98	79
	98.734,15*	85.979,47*	1.754,6*	-	39.136,4*	31.295,36*	278,78*	-	8.119,84*	98*	79*
HE-V	22,238	21,79	0,445	-	42,82	13,63	0,31	-	28,89	98	56
	6,892*	6,75*	0,138*	-	14,93*	4,22*	0,10*	-	10,61*	98*	55*
HE-VI	2,17	2,08	0,09	-	244,80	237,61	0,06	-	7,14	96	97
	0,67*	0,65*	0,03*	-	252,45*	249,58*	0,02*	-	2,86*	96*	96*
HE-VII	573,48	562,01	11,47	-	243,41	86,56	1,79	-	155,06	98	79
	582,72*	571,06*	11,65*	-	255,64*	87,881*	1,82*	-	165,94*	98*	77*
Kondenser	262.322,2	257.075,8	5.246,4	500,91	109.109,3	91.497,9	251,7	580,91	17.860,4	98	60
	80.605,34*	78.993,23*	1.612,1*	78,11*	29.511,97*	24.400,45*	77,37*	78,11*	5.412,27*	98*	82*
P-I	44.947,82	45.348,84	-	501,27	2.608,04	3.009,05	-	501,27	100,25	99	97
	13.811,3*	13.934,6*	-	154,03*	801,39*	924,61*	-	154,03*	30,81*	99*	97*
P-II	278.035,3	279.095,9	-	1.325,76	64.971,19	66.031,8	-	1.325,76	265,15	99	99
	85.433,6*	85.759,5*	-	407,37*	19.964,1*	20.289,9*	-	407,37*	81,48*	99*	99*
P-VI	722,99	723,25	-	0,33	10,27	6,03	-	0,33	4,57	99	61
	734,64*	734,91*	-	0,33*	10,44*	6,13*	-	0,33*	4,65*	99*	60*
T-I	420.503,6	330.470,1	-	76528,5	151.367,4	61.333,88	-	76.528,5	13.505,0	79	91
	129.210,7*	101.545,5*	-	23.515,3*	46.511,5*	18.846,4*	-	23.515,3*	4.419,7*	78*	91*

Tablo 4.20. (Devamı)

Bileşen	$\dot{E}_{küttele,g}$ kW	$\dot{E}_{küttele,\zeta}$ kW	\dot{Q} kW	\dot{W} kW	$\dot{E}x_{küttele,g}$ kW	$\dot{E}x_{küttele,\zeta}$ kW	$\dot{E}x_Q$ kW	$\dot{E}x_W$ kW	$\dot{E}x_d$ kW	η %	ϵ %
T-II	558.907,7	540.357,6	-	15.767,6	99.239,67	80.689,47	-	15.767,6	2.782,5	96	97
	171.739,0*	166.038,9*	-	4.845,1*	30.493,9*	24.793,94*	-	4.845,1*	855,0*	97*	98*
AC	452,55	569,79	-	136,33	0,01	13,62	-	136,33	122,72	97	86
	446,24*	562,76*	-	135,5*	0,12*	10,27*	-	135,5*	125,34*	96*	84*
CC	639,39	2.194,64	715,62	-	3.313,61	5.134,98	542,04	-	1.279,33	43	61
	625,87*	2.188,63*	684,78*	-	3.338,57*	5.163,08*	516,58*	-	1.307,9*	42*	60*
GT	2.133,55	1.188,05	-	813,13	993,26	250,92	-	813,13	70,78	80	92
	2.167,27*	1.204,13*	-	828,3*	1.010,93*	254,35*	-	828,3*	71,72*	82*	92*
SOEC	12.397,31	15.987,35	1,039	89.409,4	40.444,42	43.938,2	0,72	89.409,4	85.914,8	45	62
	3.824,29*	4.954,95*	1,04*	27.710,6*	12.534,91*	13.617,7*	0,72*	27.710,6*	26.627,1*	40*	60*
Tüm sistem:										35.86	33.70

*TED modu

Tablo 4.20'de verilen sonuçlara göre, multijenerasyon sisteminin genel enerji ve ekserji verimlilikleri sırasıyla %35,86 ve %33,70 olarak hesaplanmıştır. Bulgular, sistem içindeki ekserji yıkımının en yüksek oranda PTSC ve SOEC'de meydana geldiğini göstermektedir. PTSC ünitesindeki yüksek ekserji kaybı esas olarak optik kayıplardan, yansıma verimsizliklerinden ve kollektör yüzeyinden çevreye olan termal kayıplardan kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde, SOEC ünitesindeki yüksek ekserji yıkımı, yüksek sıcaklık koşulları altında meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlarla ilişkili geri döndürülemezliklere ve yüksek akım yoğunluklarında artan ohmik kayıplara bağlanabilir. Multijenerasyon sisteminin NBD analiz sonuçları Tablo 4.21’de verilmiştir.

Tablo 4.21. Multijenerasyon sisteminin NBD analiz sonuçları

Yatırım	Bugün	5	10	15	20
GA maliyeti	-67.736.850,0				
TED maliyeti	-10.625.516,65				
GB maliyeti	-12.031.610,75				
Brayton çevrimi maliyeti	-2.063.654,31				
Çürütme alanı maliyeti	-1.149.979,05				
SOEC ünitesi maliyeti	-7.822,47				
Toplam maliyet	-108.043.730,42				
Hurda maliyeti	-10.804.373,04				
İlk yatırım maliyeti	-97.239.357,38				
Nakit akışı (US\$)					
Bakım onarım maliyeti	-14.585.465,34	-729.273,27	-729.273,27	-729.273,27	-729.273,27
Personel giderleri	-92.211,79	-92.211,79	-92.211,79	-92.211,79	-92.211,79
Elektrik üretimi	12,079,367,38	12,079,367,38	12,079,367,38	12,079,367,38	12,079,367,38
Hidrojen kazancı	4.570,065	4.570,065	4.570,065	4.570,065	4.570,065
Bertaraf ücreti	399.529,0	399.529,0	399.529,0	399.529,0	399.529,0
Atık ısı kazancı	31.661,16	31.661,16	31.661,16	31.661,16	31.661,16
Toplannakit akışı	-97.239.357,38	11.693.643,14	11.693.643,14	11.693.643,14	11.693.643,14
Kümülatif nakit akışı	-97.239.357,38	-38.768.219,89	19.699.995,79	79.168.211,47	136.636.427,14
İskonto oranı (%13)	1	0,62	0,39	0,24	0,15
Bugünkü değer	-97.239.357,38	7.260.832,37	4.508.405,64	2.799.365,19	1.738.185,54
NBD (US\$)			2.308.939,31		

Tablo 4.21'de verilen ekonomik değerlendirme sonuçları, GA'nın ilk yatırım maliyetinin diğer sistem bileşenlerine kıyasla oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum, PTSC kurulumunda kullanılan malzeme ve altyapı yatırımlarının toplam sistem maliyetinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Ancak yapılan analizler, sistemin geri ödeme süresinin yaklaşık 9 yıl olduğunu göstermektedir. Ayrıca, 20 yıllık işletme ömrü sonunda hesaplanan NBD 2,308 milyon US\$ olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, yüksek ilk maliyetlere rağmen sistemin hem ekonomik olarak uygulanabilir hem de uzun vadede yatırım için cazip olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Bilecik ili koşulları dikkate alınarak güneş ve biyogaz enerji potansiyeli değerlendirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, güneş enerjisi destekli iki kademeli bir güç çevrimi tasarlanmıştır. Sistem atık ısının değerlendirilmesi yönünden daha verimli ve sürdürülebilir bir çözüm sunarsa, kış aylarında güneş enerjisinin düşük radyasyon değerine sahip olmasından dolayı tek başına yeterli olmamıştır. Bu nedenle, ikinci aşamada alternatif bir enerji kaynağı olarak biyokütle enerjisi değerlendirilmiştir. Bu bağlamda Bilecik'in biyokütle potansiyeli belirlenmiş ve buna bağlı olarak üretilebilecek biyogaz miktarı hesaplanmıştır. Elde edilen biyogazın bir kojenerasyon çevriminde kullanımı değerlendirilmiş ve bu sayede hem elektrik hem de ısı üretimi sağlanmıştır. Üçüncü aşamada, daha yüksek alev sıcaklığı ve yanma verimi elde edebilmek amacıyla yanma havasının hidrojen ve oksijen ile zenginleştirilmesi üzerinde durulmuştur. Bu kapsamda, PEM ve SOEC ünitelerinden elde edilen hidrojen ve oksijenin sistem performansına etkileri incelenmiştir. Son aşamada ise güneş ve biyokütle enerjisinin birlikte kullanıldığı, hidrojenle zenginleştirilmiş bir multijenerasyon sistemi tasarlanarak termodinamik ve ekonomik açıdan değerlendirilmiştir. Eş zamanlı olarak elektrik, hidrojen ve sıcak su üreten bu sistem güneş alanı, termal enerji depolama ünitesi, güç bloğu, SOEC ünitesi, biyogaz üretim alanı, brayton çevrimi ve alt ısı depolama ünitesi olmak üzere yedi ana bileşenden oluşmaktadır. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Bilecik ili için en yüksek DNI değeri 1 Temmuz gününde 541 W/m^2 'dir.
- Güneş enerjisi destekli iki kademeli güç çevrimi sisteminde ORC alanında en uygun çalışma akışkanı R152a olarak belirlenmiştir.
- Biyogaz çürütme alanında, belediye atıklarından $6396 \text{ m}^3/\text{gün}$ biyogaz elde edilebilir.
- PEM ve SOEC ünitelerinin entegre edildiği sistemler karşılaştırıldığında, SOEC entegre edilen sistem ile daha yüksek yanma sonu sıcaklıklarına ulaşılabildiği ve sistemin hem termodinamik hem de ekonomik açıdan daha üstün özellikler gösterdiği görülmüştür.
- Güneş enerjisi ve biyogaz enerjisinin birlikte kullanıldığı multijenerasyon sistemi termodinamik ve ekonomik açıdan değerlendirilmiştir. Bu bağlamda en uygun sistem parametreleri şu şekildedir; $\varphi = \%50$, $CR = 2$, $T_{SOEC} = 973 \text{ K}$ ve $J = 3000 \text{ A/m}^2$.
- Güneş enerjisi destekli iki kademeli güç çevriminden elde edilen $117,21 \text{ MW}$ gücün $\%49$ 'u SOEC ünitesini çalıştırmak için kullanılır.

- Multijenerasyon sisteminde 0,187 kmol/s H₂ ve 0,093 kmol/s O₂ üretebilmektedir. Üretilen oksijenin yanma odasına geri beslenmesiyle, yanma sonu ürün sıcaklığı 1229,22 K olarak belirlenmiştir.
- Mevsimsel kullanıma uygun olarak sistemden günde 9930,39 MJ ısı depolanabilmektedir. Bu ısı yaz aylarında 528 konutun sıcak su ihtiyacını, kış aylarında ise 262 konutun hem sıcak su hem de ısınma ihtiyacını karşılayabilmektedir.
- Multijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %35,86 ve %33,70'dir.
- Ekonomik analiz sonucunda multijenerasyon sisteminin 9. yıldan itibaren karlı hale geldiği ve 20 yıllık işletme ömrü sonunda 5,71 milyon US\$ kar elde edilebileceği belirlenmiştir.

Sonuç olarak, yapılan analizler multijenerasyon sisteminin hem enerji ve ekserji verimliliği hem de ekonomik uygulanabilirlik açısından umut verici olduğunu göstermiştir. Güneş enerjisinin gün içinde ve mevsimsel olarak değişkenlik göstermesi, biyogazın sürekli ve istikrarlı üretim yapısı ile dengelenir. Buna karşılık biyogazın sınırlı miktarda üretilmesi ve belirli işleme süreçleri gerektirmesi, güneş enerjisinin yüksek ısı ve elektrik üretimi ile desteklenir. Bu sayede hibrit sistemler hem kesintisiz güç üretimi sağlar hem de atık yönetiminin iyileştirilmesi ve sera gazı emisyonlarının azaltılması açısından avantaj sağlar.

KAYNAKÇA

- Abdolalipouradl, M., Mohammadkhani, F., & Yari, M. (2025). The potential of a novel multigeneration system based on a biogas-fueled gas turbine: Thermodynamic, exergoeconomic, and multi-objective assessments. *Renewable Energy*, 123282.
- Abbasi, T., Tauseef, S. M., & Abbasi, S. A. (2011). *Biogas energy*. 2. Springer Science & Business Media.
- Ahmad, A., Prakash, O., Kausher, R., Kumar, G., Pandey, S., & Hasnain, S. M. (2024). Parabolic trough solar collectors: A sustainable and efficient energy source. *Materials Science for Energy Technologies*, 7, 99-106.
- Aksa Doğalgaz. (2025). Abone ve Serbest Tüketici Satış Tarifesi. <https://www.aksadogalgaz.com.tr/Musteri-Hizmetleri/Fiyat-Tarifeleri/Satis-Tarifesi/BilecikBolu> (Erişim tarihi: 25 Ağustos 2025)
- Al-Sulaiman, F. A., Hamdullahpur, F., & Dincer, I. (2012). Performance assessment of a novel system using parabolic trough solar collectors for combined cooling, heating, and power production. *Renewable Energy*, 48, 161-172.
- Altıokka, A. B. G., & Arslan, O. (2023). Design and optimization of absorption cooling system operating under low solar radiation for residential use. *Journal of Building Engineering*, 73, 106697.
- AlZahrani, A. A., & Dincer, I. (2017). Thermodynamic and electrochemical analyses of a solid oxide electrolyzer for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(33), 21404-21413.
- Akbulut, A., Arslan, O., Arat, H., & Erbaş, O., (2021). Important aspects for the planning of biogas energy plants: Malatya case study. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 101076.
- Arslan, M., & Yılmaz, C. (2023). Investigation of green hydrogen production and development of waste heat recovery system in biogas power plant for sustainable energy applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(69), 26652-26664
- Arslan, O., & Arslan, A. E. (2024). Multi-criteria optimization of a new geothermal driven integrated power and hydrogen production system via a new index: economic sustainability (EcoSI). *Fuel*, 358, 130160.
- Arslan, O., Acikkalp, E., & Genc, G. (2022). A multi-generation system for hydrogen production through the high-temperature solid oxide electrolyzer integrated to 150 MW coal-fired steam boiler. *Fuel*, 315, 123201.
- Arslan, O., & Erbas, O. (2021). Investigation on the improvement of the combustion process through hybrid dewatering and air pre-heating process: A case study for a 150 MW coal-fired boiler. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 121, 229-240.
- Arslan, O., & Kılıç, D. (2021). Concurrent optimization and 4E analysis of organic Rankine cycle power plant driven by parabolic trough collector for low-solar radiation zone. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101230.
- Arslan O, Ozgur MA, Yildizay HD, ve Kose R (2009). Fuel effects on optimum insulation thickness: an exergitic approach. *Energy Sources Part A*, 32(2),128–47.
- Asadabadi, M. J. R., Balali, A., Moghimi, M., & Ahmadi, R.(2025). Comparative analysis of a biomass-fueled plant coupled with solid oxide fuel cell, cascaded organic Rankine cycle and liquid hydrogen production system: Machine learning approach using multi-objective grey wolf optimizer. *Fuel*, 380, 133269.
- Bahadar, A., Ahmed, M. U. B., Bilal, A., Zwawi, M., & Anwar, M. (2025). 4E performance evaluation of a decentralized multigeneration system based on coconut shells gasification, SOFC, and waste heat recovery: Power, heating, fresh water and green

- hydrogen production with CO₂ mitigation. *Energy Conversion and Management*, 345, 120341.
- Bahari M, Ahmadi A, & Dashti R. (2021). Exergo-economic analysis and optimization of a combined solar collector with steam and Organic Rankine Cycle using particle swarm optimization (PSO) algorithm. *Cleaner Eng Technol*, 4,100221.
- Bakırcı, K. (2009). Models of solar radiation with hours of bright sunshine: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2580-2588.
- Bai, J., Huang, Y., Fan, X., Cui, J., Chen, B., Chen, Y., & Guo, L. (2024). Production of high calorific value hydrogen-rich combustible gas by supercritical water gasification of straw assisted by machine learning. *Bioresource Technology*, 410, 131275.
- Bai, H., Lin, H., Chauhan, B. S., Amer, A. M., Fayed, M., Ayed, H., ... & Truong, N. (2023). Development of a novel power and freshwater cogeneration plant driven by hybrid geothermal and biomass energy. *Case Studies in Thermal Engineering*, 52, 103695.
- Bai, Y., Wang, B., & Cheng, L. (2024). A comprehensive thermodynamic, economic, and environmental analysis of a novel parabolic trough solar-driven multigeneration system for generating power, hydrogen, and freshwater. *Process Safety and Environmental Protection*, 184, 227-247.
- Bamisile, O., Dagbasi, M., Huang, Q., Williams, N., Ruwa, T., Babatunde, A., & Kemena, A. D. (2025). A biomass-integrated comprehensive energy system: Thermodynamics assessment and performance comparison of sugarcane bagasse and rice husk as input source. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 47(1), 316-333.
- Barbaro, S., Coppolino, S., Leone, C., & Sinagra, E. (1978). Global solar radiation in Italy. *Solar Energy*, 20(5), 431-435.
- Bekiloğlu, H. E., Bedir, H., & Anlaş, G. (2019). Multi-objective optimization of ORC parameters and selection of working fluid using preliminary radial inflow turbine design. *Energy Conversion and Management*, 183, 833-847.
- Bergman TL, Lavine AS, Incropera FP, & DeWitt DP. (2011). *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons.
- Boukelia, T. E., Arslan, O., & Mecibah, M. S. (2016). ANN-based optimization of a parabolic trough solar thermal power plant. *Applied Thermal Engineering*, 107, 1210-1218.
- Boukelia, T. E., Bessaïh, R., & Laouafi, A. (2025). A novel concentrating solar power plant design for power, cooling, and hydrogen production through integrated waste heat recovery system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 106, 295-304.
- Cao Y, Li P, Qiao Z, Ren S, & Si F. (2022). A concept of a supercritical CO₂ Brayton and organic Rankine combined cycle for solar energy utilization with typical geothermal as auxiliary heat source: Thermodynamic analysis and optimization. *Energy Reports*, 8, 322–33.
- Chan, S. H., & Xia, Z. T. (2002). Polarization effects in electrolyte/electrode-supported solid oxide fuel cells. *Journal of Applied Electrochemistry*, 32, 339-347.
- Chen, X., Wu, Y. T., Zhang, L. D., Wang, X., & Ma, C. F. (2019). Experimental study on thermophysical properties of molten salt nanofluids prepared by high-temperature melting. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 191, 209-217.
- Choi, P., Bessarabov, D. G., & Datta, R. (2004). A simple model for solid polymer electrolyte (SPE) water electrolysis. *Solid State Ionics*, 175(1-4), 535-539.
- Çengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoğlu, M. (2011). *Thermodynamics: an engineering approach*, 5, 445. New York: McGraw-Hill.
- ÇŞB (Çevre ve Şehircilik İklim Değişikliği Bakanlığı), (2017). Hayvansal gübreden biyogaz üretimi. <https://www.csb.gov.tr/> (Erişim tarihi 10 temmuz 2023).

- ÇŞB (Çevre ve Şehircilik İklim Değişikliği Bakanlığı). (2025). Atık toplama, taşıma ve bertaraf ücretleri. <https://cygm.csb.gov.tr/> (Erişim tarihi 15 Ağustos 2025).
- Duffie JA, ve Beckman WA (1991). *Solar engineering of thermal processes*. 2nd ed. New York: Wiley.
- ETKB (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı), (2022). Yenilenebilir enerji kaynakları için elektrik fiyatı, <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik>; (Erişim tarihi 05 Mayıs 2022).
- Erdoğan A, Çolpan CO, & Çakıcı DM.(2017). Thermal design and analysis of a shell and tube heat exchanger integrating a geothermal based organic Rankine cycle and parabolic trough solar collectors. *Renewable Energy*.109,372–91.
- Erikgenoğlu, D. K., & Arslan, O. (2024). Performance assessment of Brayton-biogas multigeneration system fed by the municipal wastes. *Process Safety and Environmental Protection*, 188, 664-676.
- Erikgenoğlu, D. K., Arslan, O., & Arslan, A. E. (2025). Multi-criteria decision-making optimization of a two-staged solar power plant for low radiation zone through the social decision units. *Energy Conversion and Management*, 323, 119263.
- Farajollahi, M., Almasi, N., Zahedi, A., & Kanani, B. (2025). Techno-economic analysis of a biogas power plant: Moving to sustainable energy supply and green environment through waste management. *Process Safety and Environmental Protection*, 193, 1197-1219.
- Ferguson, J. R., Fiard, J. M., & Herbin, R.(1996). Three-dimensional numerical simulation for various geometries of solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 58(2), 109-122.
- Garkoti, P., Ni, J. Q., & Thengane, S. K., (2024). Energy management for maintaining anaerobic digestion temperature in biogas plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, 114430.
- Genceli O.F.(2005). *Isı değiştiriciler*. Birsen kitabevi, İstanbul.
- GEPA (Türkiye Cumhuriyeti Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü). (2023). Bilecik Güneş Atlası, <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/pages/11.aspx>. (Erişim tarihi: 05 Mayıs 2023).
- Gholizadeh, T., Vajdi, M., & Rostamzadeh, H. (2019). A new biogas-fueled bi-evaporator electricity/cooling cogeneration system: Exergoeconomic optimization. *Energy Conversion and Management*, 196, 1193-1207.
- Gurau, V., Barbir, F., & Liu, H. (2000). An analytical solution of a half-cell Model for PEM fuel cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 147(7), 2468.
- Habibi H, Zoghi M, Chitsaz A, & Shamsaiee M. (2020). Thermo-economic performance evaluation and multi-objective optimization of a screw expander-based cascade Rankine cycle integrated with parabolic trough solar collector. *Applied Thermal Engineering*, 180,115827.
- Hernández-Pacheco, E., Singh, D., Hutton, P. N., Patel, N., & Mann, M. D. (2004). A macro-level model for determining the performance characteristics of solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 138(1-2), 174-186.
- Hosseini, S. E. (2020). Performance evaluation of a solarized gas turbine system integrated to a high temperature electrolyzer for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 45(41), 21068-21086.
- Hu, K., Fang, J., Ai, X., Huang, D., Zhong, Z., Yang, X., & Wang, L. (2022). Comparative study of alkaline water electrolysis, proton exchange membrane water electrolysis and solid oxide electrolysis through multiphysics modeling. *Applied Energy*, 312, 118788.
- Hu, Y., Luo, K., Zhao, D., Wu, Z., Yang, Y., Luo, E., Xu, J. (2024). Thermoacoustic heat pump utilizing medium/low-grade heat sources for domestic building heating. *Energy and Built Environment*, 5(4), 628-639.

- Huang, Z., Su, B., Wang, Y., Yuan, S., Huang, Y., Li, L., ... & Chen, Z. (2024). A novel biogas-driven CCHP system based on chemical reinjection. *Energy*, 297, 131238.
- Imarc (2025), Hydrogen Prices, Trend, Chart, Demand, Market Analysis, News, Historical and Forecast Data Report 2025 Edition, <https://www.imarcgroup.com/hydrogen-pricing-report> (Erişim tarihi 15 Aug 2025).
- Javadi MA, Abhari MK, Ghasemiasl R, & Ghomashi H. (2021) Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a new multigeneration system based on double-flash geothermal power plant and solar power tower. *Sustainable Energy Technol Assess*, 47,101536.
- Kakac S, Liu H, & Pramuanjaroenkij A.(2002). *Heat exchangers: selection, rating, and thermal design*. CRC Press.
- Karaali, R., ve Ozturk, I. T. (2007). A Review on Improvement Efficiency of Gas Turbine Cogeneration Systems. *Engineer and Machinery*, 49(577), 16-21
- Kaynarca, H., Kılıç, T., Açıkkalp, E., & Kandemir, S. Y. (2021). Eskişehir'in biyogaz potansiyelinin değerlendirilmesi. *Coğrafya dergisi*, (42), 271-282.
- Khandelwal N, Sharma M, Singh O, & Shukla AK (2022). Comparative evaluation of Integrated Solar combined cycle plant with cascade thermal storage system for different heat transfer fluids. *Journal of Cleaner Production*, 353,131519.
- Kılıç, D. (2019). Parabolik oluk tipi güneş toplayıcı güç santralinin YSA tabanlı optimizasyonu. [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi.
- Kalogirou, S. A. (2013). *Solar energy engineering: processes and systems*. Academic Press.
- Kour, G., Basak, N., & Kumar, S. (2024). State-of-the-art techniques to enhance biomethane/biogas production in thermophilic anaerobic digestion. *Process Safety and Environmental Protection*. 186, 104-117.
- Lee H. (2022) *Thermal design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells*. John Wiley & Sons.
- Li J, Li P, Pei G, Alvi JZ, & Ji J.(2016). Analysis of a novel solar electricity generation system using cascade Rankine cycle and steam screw expander. *Applied Energy*, 165, 627–38.
- Li P, Qian T, Li J, Lin H, Wang Y, Pei G, vd. (2023). Thermo-economic analysis of a novel partial cascade organic-steam Rankine cycle. *Energy Conversion and Management*, 283, 116941.
- Li, P., Ye, J., Li, J., Wang, Y., Jiang, X., Qian, T., ... & Liu, X. (2023). Thermodynamic and techno-economic analysis of a direct thermal oil vaporization solar power system. *Energy*, 282, 128963.
- Li, Y., Xie, T., & Ma, L. (2025). Energy and financial evaluation of a hydrogen-producing multigeneration system for sustainable development. *International Journal of Hydrogen Energy*, 140, 815-830.
- Liu, X., Zhong, Y., Li, J., Wang, H., & Wang, M. (2025). A study of thermal physical properties and molecular dynamics simulations of a high thermal stability sulfate molten salt. *Journal of Energy Storage*, 107, 114981.
- Maliyet indeksi. (2025). Cost Indices. <https://toweringskills.com/financial-analysis/cost-indices/> (Erişim tarihi 10 Temmuz 2025].
- Mantha, D., Wang, T., & Reddy, R. G. (2013). Thermodynamic modeling of eutectic point in the LiNO₃-NaNO₃-KNO₃-NaNO₂ quaternary system. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 118, 18-21.
- MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü), (2025). Resmi istatistikler, <https://www.mgm.gov.tr/>. (Erişim tarihi 10 şubat 2025)
- Mirjavadi K, Pourfayaz F, Pourmoghadam P, & Kasaeian A. (2022). A comparison of using organic Rankine and Kalina cycles as bottom cycles in a solar-powered steam Rankine cycle. *Energy Sci Eng*. 20(8):2714–31.

- Mosleh, H. J., & Ahmadi, R. (2019). Linear parabolic trough solar power plant assisted with latent thermal energy storage system: A dynamic simulation. *Applied Thermal Engineering*, 161, 114204.
- Ni, M., Leung, M. K., & Leung, D. Y. (2006). A modeling study on concentration overpotentials of a reversible solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources*, 163(1), 460-466.
- Ni, M., Leung, M. K., & Leung, D. Y. (2007). Parametric study of solid oxide steam electrolyzer for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(13), 2305-2313.
- Oxygen Price (2025). Oxygen reference price. <https://www.pharmacompass.com/price/oxygen?>. (Erişim tarihi 15 Ağustos 2025)
- Rabeti, S. A. M., Manesh, M. H. K., Blanco-Marigorta, A. M., & Del Río-Gamero, B. (2026). Multi-objective optimization, techno-economic analysis, and life cycle assessment of an innovative solar-biomass-driven cogeneration system integrated with MED-RO-MD: A case study of the Canary Islands. *Renewable Energy*, 256, 123757.
- Reddy R.G. (2013). *Novel molten salts thermal energy storage for concentrating solar power generation*. Technical Report DE-FG36-08GO18153, University of Alabama (UA), Tuscaloosa, Alabama, USA.
- REFPROP. (2010). Reference Fluid thermodynamics and transport properties. NIST reference database, Version 9.0. National Institute of Standards. NIST, USA: and Technology.
- Sabbaghi, M. A., Soltani, M., & Rosen, M. A. (2024). A comprehensive 6E analysis of a novel multigeneration system powered by solar-biomass energies. *Energy*, 297, 131209.
- Seirafi, F., Ebrahimi, R., Ghaebi, H., & Bayareh, M. (2024). Pinch, energy, and exergy analysis for a power-hydrogen cogeneration system fueled by biogas. *Process Safety and Environmental Protection*, 183, 1223-1238.
- Sharifishourabi, M., Dincer, I., & Mohany, A. (2025). A New Biomass-Solar Based Energy System with Hydrogen Production Designed for Sustainable Communities. *Energy*, 138416.
- Smolinka, T., Ojong, E. T., & Garce, J. (2015). Hydrogen production from renewable energies—electrolyzer technologies. In *Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing*. 103-128.
- SOLUTIA. (2020). Properties of Therminol-VP1, <http://twf.mpei.ac.ru/tthb/hedh/htf-vp1.pdf>; (Erişim tarihi 5 Mayıs 2022).
- Sundar LS, Punnaiah V, Sharma KV, Chamkha AJ, & Sousa AC (2021). Thermal entropy and exergy efficiency analyses of nanodiamond/water nanofluid flow in a plate heat exchanger. *Diam Relat Mater*. 120, 108648.
- Tempesti, D., Manfrida, G., & Fiaschi, D. (2012). Thermodynamic analysis of two micro CHP systems operating with geothermal and solar energy. *Applied Energy*, 97, 609-617.
- Thampan, T., Malhotra, S., Zhang, J., & Datta, R. (2001). PEM fuel cell as a membrane reactor. *Catalysis Today*, 67(1-3), 15-32.
- Thampan, T., Malhotra, S., Zhang, J., & Datta, R. (2001). PEM fuel cell as a membrane reactor. *Catalysis Today*, 67(1-3), 15-32.
- Tiwari, G. N., & Tiwari, A. (2016). *Handbook of solar energy*, 498. Singapore: Springer.
- Toker, S. C., Soyuturk, G., & Kizilkan, O. (2022). Development of a sustainable multi-generation system with re-compression sCO₂ Brayton cycle for hydrogen generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(45), 19397-19410.
- Trinca, A., Rispoli, A. L., Sapone, V., Bubbico, R., & Vilardi, G. (2023). Combined clean hydrogen production and bio-active compounds recovery from spent coffee grounds. A multi-perspective analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, 173, 1-12.

- TS825 (2008). Binalar için ısı yalıtım gereksinimleri. Türk Standartları Enstitüsü Ankara, Türkiye.
- Turchi, C. S., Boyd, M., Kesseli, D., Kurup, P., Mehos, M. S., Neises, T. W., ... & Wendelin, T. (2019). CSP systems analysis-final project report (No. NREL/TP5500-72856). *National Renewable Energy Lab. (NREL)*, Golden, CO (United States).
- Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., & Shaeiwitz, J. A. (2008). *Analysis, synthesis and design of chemical processes*. Pearson Education.
- Türk, C. G., & Dinçer, I. (2025). Design and thermodynamic analysis of an advanced thermal system powered by solar and biomass sources. *Thermal Science and Engineering Progress*, 103807.
- Uçar, M., & Arslan, O. (2021). Assessment of improvement potential of a condensed combi boiler via advanced exergy analysis. *Thermal Science and Engineering Progress*, 23, 100853.
- Vaillant, (2025), Vaillant kombi, <https://www.vaillant.gen.tr/vaillant-ecotec-plus-vuw-36-cs-1-5-plus-yogusmali-kombi-isitma-26-000-kcal-h-ve-sicak-su-29-000-kcal-h-nasil-fiyatlari-satin-al.htm> (Erişim tarihi 2 Eylül 2025)
- Vasan, V., Sridharan, N. V., Feroskhan, M., Vaithyanathan, S., Subramanian, B., Tsai, P. C., Lin, Y.C., Lay, C.H., Wang, C.T., & Ponnusamy, V. K., (2024). Biogas Production and its Utilization in Internal Combustion Engines-A Review. *Process Safety and Environmental Protection*. 186, 518-539.
- Venkatesaperumal R, Syed Jafar K, Elumalai PV, Abbas M, Cuce E, Shaik S, et al. (2022). Heat Transfer Studies on Solar Parabolic trough Collector Using Corrugated Tube Receiver with Conical Strip Inserts. *Sustainability*. 15(1), 378
- Visitdumrongkul, N., Tippawan, P., Authayanun, S., Assabumrungrat, S., & Arpornwichanop, A.(2016). Enhanced performance of solid oxide electrolysis cells by integration with a partial oxidation reactor: Energy and exergy analyses. *Energy Conversion and Management*, 129, 189-199.
- Yan, X., Yao, K., Han, Y., Hou, J., Mao, X., & Li, M. (2025). Proposal of a hybrid biomass/geothermal driven multigeneration system for methanol, power, and hydrogen production: A thermodynamic and economic assessment. *Energy*, 324, 135954.
- Yüksel, Y. E. (2018). Thermodynamic assessment of modified Organic Rankine Cycle integrated with parabolic trough collector for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(11), 5832-5841.
- Zare, A. D., Saray, R. K., Mirmasoumi, S., & Bahlouli, K. (2019). Optimization strategies for mixing ratio of biogas and natural gas co-firing in a cogeneration of heat and power cycle. *Energy*, 181, 635-644.
- Zare, M., Zare, V., & Talati, F. (2025). Multi-objective optimization of a biogas-fired gas turbine incorporated with closed Brayton and ejector power/cooling co-generation cycles. *Renewable Energy Focus*, 52, 100658.
- Zendehboudi, A. (2024). Energy, exergy, and exergoeconomic analyses of an air source transcritical CO₂ heat pump for simultaneous domestic hot water and space heating. *Energy*, 290, 130295.