



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



LNG' NİN SOĞUK ENERJİSİNİ KULLANAN
BİR GÜÇ SİSTEMİNİN İLERİ EKSERJİ VE
EKSERGO-EKONOMİK ANALİZLERİ

Canan KORKMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Canan Korkmaz tarafından hazırlanan “LNG’ nin Soğuk Enerjisini Kullanan Yeni Bir Güç Sisteminin İleri Ekserji ve Eksergo-Ekonomik Analizleri” adlı tez çalışması 11/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

DR. Öğr. Üyesi Mehmet Numan Kaya

.....

Danışman

Doç. Dr. Dilek Nur Özen

.....

Üye

DR. Öğr. Üyesi Esra Hançer Güleriyüz

.....

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

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY

FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Canan KORKMAZ

Tarih:

ÖZET**YÜKSEK LİSANS TEZİ****LNG' NİN SOĞUK ENERJİSİNİ KULLANAN BİR GÜÇ SİSTEMİNİN İLERİ EKSERJİ VE EKSERGO-EKONOMİK ANALİZLERİ****Canan KORKMAZ****Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Unvanı Adı SOYADI****2025, 75 Sayfa****Jüri****Doç. Dr. Dilek Nur Özen
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Numan Kaya
Dr. Öğr. Üyesi Esra Hançer Gülerüz**

Bu çalışma, jeotermal enerjiyi ısı kaynağı ve sıvılaştırılmış doğal gazın (LNG) soğuk enerjisini ısı giderici olarak kullanan bir yeniden sıkıştırılmalı süperkritik CO₂ (S-CO₂) çevriminin tasarımını sunmaktadır. Sistem performansı, ileri ekserji tabanlı analiz teknikleri kullanılarak değerlendirilmiş ve NSGA-II yöntemi ile çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, doğal gaz türbini (T-2), ısı değiştirici-2 (ID-2), ısı değiştirici-3 (ID-3) ve sıvılaştırılmış doğal gaz pompasının (P-1), ekserji yıkımı açısından en yüksek iyileştirme potansiyeline sahip bileşenler olduğunu göstermektedir. Sistem için toplam ekserji yıkım iyileştirme potansiyeli %14 olarak hesaplanmıştır. Ekserji yıkım maliyeti açısından sistemin iyileştirme potansiyeli %46'dır ve doğal gaz türbini (T-2), sıvılaştırılmış doğal gaz pompası (P-1) ve jeotermal türbin (T-3), maliyet azaltımı için kilit bileşenler olarak belirlenmiştir. İleri eksergo-çevresel analiz, ekserji yıkımına bağlı en yüksek çevresel iyileştirme potansiyelinin doğal gaz türbini (T-2), jeotermal türbin (T-3) ve sıvılaştırılmış doğal gaz pompasında (P-1) olduğunu ve toplam çevresel iyileştirmenin %22 seviyesinde gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, çok amaçlı optimizasyon; enerji verimliliği, ekserji verimliliği, maliyet ve çevresel etki faktörleri dahil tüm performans kriterlerinde iyileşmelere yol açmış, sistem genelinde %7.15'e kadar iyileştirme sağlanmıştır. Bu bulgular, S-CO₂ çevrim sisteminin ekserji, maliyet ve çevresel etki açısından optimize edilmesi için önemli bir potansiyel sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Çok amaçlı optimizasyon; İleri eksergo-çevresel analiz; İleri eksergo-ekonomik analiz; Jeotermal enerji; LNG (sıvılaştırılmış doğal gaz) soğuk enerjisi; Yeniden sıkıştırılmalı süperkritik CO₂ (S-CO₂).

ABSTRACT**MS****ADVANCED EXERGY AND EXERGO-ECONOMIC ANALYSIS OF A POWER SYSTEM USING COLD ENERGY OF LNG****Canan KORKMAZ****THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF IN MECHANICAL ENGINEERING****Advisor: Unvanı Adı SOYADI****2025, 75 Pages****Jury****Doç. Dr. Dilek Nur Özen****Dr. Lecturer Member Mehmet Numan Kaya****Dr. Lecturer Member Esra Hançer Güteryüz**

This study presents the design of a recompression supercritical CO₂ (S-CO₂) cycle, utilizing geothermal energy as the heat source and liquefied natural gas (LNG) cold energy as the heat sink. The system's performance was evaluated using advanced exergy-based analysis techniques, and multi-objective optimization was carried out using the NSGA-II method. The results show that the natural gas turbine (T-2), heat exchanger-2 (ID-2), heat exchanger-3 (ID-3), and the liquefied natural gas pump (P-1) have the highest improvement potential in terms of exergy destruction. The total exergy destruction improvement potential for the system is calculated as 14%. In terms of exergy destruction cost, the system's improvement potential is 46%, with the natural gas turbine (T-2), liquefied natural gas pump (P-1), and geothermal turbine (T-3) identified as key components for cost reduction. The advanced exergo-environmental analysis reveals that the highest environmental improvement potential due to exergy destruction is found in the natural gas turbine (T-2), geothermal turbine (T-3), and liquefied natural gas pump (P-1), with a total environmental improvement of 22%. Additionally, multi-objective optimization led to improvements in all performance criteria, including energy efficiency, exergy efficiency, cost, and environmental impact factors, with overall system improvements of up to 7.15%. These findings demonstrate the significant potential for optimizing the S-CO₂ cycle system in terms of exergy, cost, and environmental impact.

Keywords: Advanced exergo-economic analysis; Advanced exergo-environmental analysis; Geothermal energy; LNG cold energy; Multi-objective optimization; Recompression supercritical CO₂ (S-CO₂).

ÖNSÖZ

Tezimin hazırlanması sırasında tecrübelerini, bilgi birikimini ve emeğini esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın her aşamasında yanımda olan değerli eşim ve meslektaşım Ali Ergün KORKMAZ'a teşekkür ederim. Ayrıca, varlığıyla bana hayatımın en büyük neşesini veren, yüksek lisans sürecimle beraber büyüttüğüm canım oğlum Uras KORKMAZ'a da en derin sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Her daim desteklerini hissettiğim bana sınırsız destek veren ve en büyük motivasyon kaynağım olan kıymetli annem Semahat MUŞMUL, canım babam Metin MUŞMUL ve canım kardeşim Hakan MUŞMUL'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen değerli ailem Türkan KORKMAZ, Dursun Halil KORKMAZ ve Tuana KORKMAZ'a teşekkür ederim.

Canan KORKMAZ
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	1
ABSTRACT.....	2
ÖNSÖZ	3
İÇİNDEKİLER.....	4
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	5
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	7
1. GİRİŞ.....	10
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
3.1. Sistemin Matematik Modeli ve Kabuller.....	25
3.2. Güç Sisteminin Termodinamik Analizi.....	26
3.3. Ekserji Analizi	28
3.3.1. Geleneksel ekserji analizi	29
3.3.2. İleri ekserji analizi	31
3.4. Eksergo-ekonomik Analiz	32
3.4.1. Geleneksel eksergo-ekonomik analiz	32
3.4.2. İleri eksergo-ekonomik analiz	35
3.5. Eksergo-Çevresel Analiz	36
3.5.1 Geleneksel eksergo-çevresel analiz	36
3.5.2 İleri eksergo-çevresel analizi	39
3.6. Genel Sistemin Performans Kriterleri.....	42
3.7. Genel Sistemin Duyarlılık Analizi.....	43
3.8. Önerilen Güç Sistemin Çok Amaçlı Optimizasyonu Çalışması	43
3.9. Model Doğrulama	44
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	46
4.1. Önerilen Güç Sisteminin Duyarlılık Analizi	56
4.2. Önerilen Güç Sisteminin Çok Amaçlı Optimizasyon Çalışması	60
5. SONUÇ	62
6. KAYNAKÇALAR	64

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Isı transfer alanı (m^2)
b	: Birim çevresel etki (mPts/kJ)
$b_{f,k}$: Besleme birimi k bileşeninin çevresel etkisi (mPts/kJ)
$b_{p,k}$: Ürün birimi bileşen k'nin çevresel etkisi (mPts/kJ)
$b_{p,amaç,toplam}^{adv}$: Modifiye ortalama birim ürün çevresel etkisi (mPts/kJ)
$b_{p,amaç,toplam}$: Ortalama birim ürün çevresel etkisi (mPts/kJ)
\dot{B}	: Çevresel etki oranı (mPts/s)
c	: Birim ekserji maliyeti (\$/kJ)
$c_{f,k}$: Bileşen k'nin besleme birim ekserji maliyeti (\$/kJ)
$c_{p,amaç,toplam}^{adv}$: Modifiye ortalama birim ürün maliyeti (\$/GJ)
$c_{p,amaç,toplam}$: Ortalama birim ürün maliyeti (\$/GJ)
$c_{p,k}$: Ürün birim ekserji maliyeti bileşen k birimi (\$/kJ)
\dot{C}	: Maliyet oranı (\$/s)
\dot{E}_x	: Ekserji oranı (kW)
$\dot{E}_{x,in}$: Giriş ekserji oranı (kW)
$\dot{E}_{x,F,k}$: Bileşen k'nin besleme ekserji oranı (kW)
$\dot{E}_{x,P,k}$: Bileşen k'nin ürün ekserji oranı (kW)
h	: Özgül entalpi (kJ/kg)
\dot{m}	: Kütle akış hızı (kg/s)
P_R	: Basınç oranı
\dot{Q}	: Isı transfer oranı (kW)
s	: Özgül entropi (kJ/(kg. K))
T	: Sıcaklık (K)
\dot{W}	: Bileşenler tarafından üretilen veya tüketilen güç (kW)
\dot{Z}_k	: Bileşen k'nin sermaye maliyet oranı (\$/s)

Kısaltmalar

adv	: İleri
AV	: Kaçınılabilir
EN	: Endojen

EX	: Eksojen
KN	: Kinetik
UN	: Kaçınılamaz
0	: Referans ortam durumu
C	: Kompresör
K-1	: CO ₂ ana kompresör
ID-4	: CO ₂ düşük sıcaklık rekuperatörü
K-2	: CO ₂ rekompresyon kompresörü
T-1	: CO ₂ türbin
D	: Yıkım
GV	: Genleşme vanası
FT	: Flaş tank
P-2	: Jeotermal pompa
T-3	: Jeotermal türbin
ID	: Isı değiştirici
P-1	: LNG pompa
T-2	: NG türbin
T	: Türbin
η_{enerji}	: Sistemin enerji verimliliği (%)
η_{ekserji}	: Sistemin ekserji verimliliği (%)
$\eta_{\text{ekserji}}^{\text{adv}}$: Modifiye ekserji verimliliği (%)
η_K	: Kompresörün izentropik verimliliği (%)
η_T	: Türbinin izentropik verimliliği (%)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Dünya haritası üzerinde LNG dağılımının gösterimi	11
Şekil 3.1. Jeotermal kaynak, süperkritik karbondioksit ve LNG' nin soğuk enerjisini kullanan birleşik güç sisteminin şematik gösterimi	24
Şekil 3.2. Sistemin önerilen matematiksel modelinin akış şeması	25
Şekil 3.3. ExD, k bölümlerini elde etmek için kullanılan denklemler	31
Şekil 3.4. C değerlerinin bölümlerini hesaplamak için kullanılan denklemler.....	36
Şekil 3.5. Z değerlerinin bölümlerini hesaplamak için kullanılan denklemler.....	36
Şekil 3.6. ExD, k ile ilgili çevresel etki bölüşüm denklemleri.....	41
Şekil 3.7. Sistem bileşeniyle ilgili çevresel etki bölüşüm denklemleri	42
Şekil 4.1. Sistem bileşenlerinin kaçınılmaz, kaçınılabılır içsel ve dışsal ekserji yıkım oranları	48
Şekil 4.2. Sistem bileşenlerinin kaçınılmaz, kaçınılabılır içsel ve dışsal ekserji yıkım maliyeti oranları	50
Şekil 4.3. Sistem bileşenlerinin kaçınılmaz, kaçınılabılır içsel ve dışsal yatırım oranları	52
Şekil 4.4. Sistem bileşenlerinin ekserji yıkım oranlarının kaçınılmaz, kaçınılabılır içsel ve dışsal çevresel etkileri	54
Şekil 4.5. Sistem bileşenlerinin kaçınılmaz, kaçınılabılır içsel ve dışsal çevresel etkileri	56
Şekil 4.6. ID-3'teki sıcaklık farkının tüm sistemin performans kriterleri üzerindeki etkisi	57
Şekil 4.7. T-1 verimliliğinin genel sistem performans kriterleri üzerindeki etkisi.....	58
Şekil 4.8. ID-3'teki Sıcaklık Farkının Tüm Sistem Performans Kriterleri Üzerindeki Etkisi	59
Şekil 4.9. ID-3'teki sıcaklık farkının genel sistemin performans kriterleri üzerindeki etkisi	59
Şekil 4.10. ID-3'teki sıcaklık farkının genel sistem performans kriterleri üzerindeki etkisi	60
Şekil 4.11. Önerilen Sistemin Pareto Sınırı Dağılımı.....	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Literatürde, LNG-jeotermal sistemlerin geleneksel/ileri ekserji, eksergo-ekonomik ve eksergo-çevresel analizlerine ilişkin çalışmalar.....	15
Çizelge 3.1. Önerilen sistemin simülasyon koşulları	26
Çizelge 3.2. Sistem bileşenlerinin gerçek, ideal ve kaçınılmaz koşulları (Açikkalp, Aras, ve Hepbaslı 2014; Bahadori 2014b; Ebadollahi vd. 2019; Emadi ve Mahmoudimehr 2019; Ghaebi, Namin, vd. 2018; Ghaebi, Parikhani, vd. 2018; Habibi vd. 2018; Habibollahzade vd. 2022; Hassani Mokarram ve Mosaffa 2020; Hu vd. t.y.; Kwak vd. 2020; Lin vd. 2025)	32
Çizelge 3.3. SPECO analizinde kullanılan ekonomik parametreler	33
Çizelge 3.4. Sistemin bileşenleri için Zk değerleri	35
Çizelge 3.5. Sistem bileşenlerinin ağırlık denklemleri (Cavalcanti 2017b; Ren vd. 2023; Tsatsaronis, Boyano, ve Blanco-Marigorta 2010a; Wang vd. 2022).....	39
Çizelge 3.6. Önerilen güç sisteminin bileşenlerine ait tahmini malzeme bileşimi ve Eco-indicator 99 değerlerine göre, gerçek ve kaçınılmaz durumların çevresel etkileri değerlendirilmiştir (Cavalcanti 2017a; Tsatsaronis, Boyano, ve Blanco-Marigorta 2010b; Wang vd. 2020).....	40
Çizelge 3.7. Karar değişkenlerinin değişim aralığı	43
Çizelge 3.8. NSGA-II yöntemi simülasyon koşullar	44
Çizelge 3.9. Anahtar parametrelerin değişim aralığı	44
Çizelge 3.10. Jeotermal akışla çalışan açık güç çevrimi için mevcut model ile Ref.(Wang vd. 2015)'teki modelin karşılaştırılması	45
Çizelge 3.11. Jeotermal akışla çalışan açık güç çevrimi için mevcut model ile Ref. (Ruiz-Casanova vd. 2024)'teki modelin karşılaştırılması.....	45
Çizelge 4.1. Birleşik güç sisteminin termodinamik analiz verileri.....	46
Çizelge 4.2. Önerilen güç sisteminin bileşenleri için ekserji oranı türleri	47
Çizelge 4.2. Önerilen güç sisteminin bileşenleri için ekserji oranı türleri (Devamı)	47
Çizelge 4.3. Önerilen güç sisteminin bileşenleri için maliyet oranı türleri	49
Çizelge 4.3. Önerilen güç sisteminin bileşenleri için maliyet oranı türleri (Devamı)....	49
Çizelge 4.4. Önerilen güç sisteminin bileşenleri için yatırım maliyeti oranı türleri	51
Çizelge 4.4. Önerilen güç sisteminin bileşenleri için yatırım maliyeti oranı türleri (Devamı)	51
Çizelge 4.5. Ekserji yıkımının ileri eksergo-çevresel etkisi	53

Çizelge 4.5. Ekserji yıkımının ileri eksergo-çevresel etkisi (Devamı).....	53
Çizelge 4.6. İleri eksergo-çevresel analiz için bileşenle ilgili çevresel etki oranları.....	55
Çizelge 4.6. İleri eksergo-çevresel analiz için bileşenle ilgili çevresel etki oranları (Devamı).....	55
Çizelge 4.7. Sistemin Optimizasyon Sonuçları ile Temel Durumunun Karşılaştırılması	61



1. GİRİŞ

Küresel güçlüklerden meydana gelen çevre kirliliği, enerji kıtlığı ve iklimdeki değişiklikler, büyüyen tartışmalar kapsamında geniş kapsamda enerji kavramları ve yeşil kalkınma toplum içerisinde sıkça rastlanan bir ilgiye sahip olmuştur (Wang ve ark., 2013). Birçok ülke sera yayılımlarını azaltmak isterken enerji ihtiyacına cevap verebilmek için kullanıldığında daha az kirlletici bir enerji kullanmayı hedeflemektedir. Bu sebeple kömür ve petrol gibi fosil enerji kaynakları yerine doğalgaz kullanımı yaygınlaşmaya kısmen başlanmıştır (Kwak ve ark., 2020).

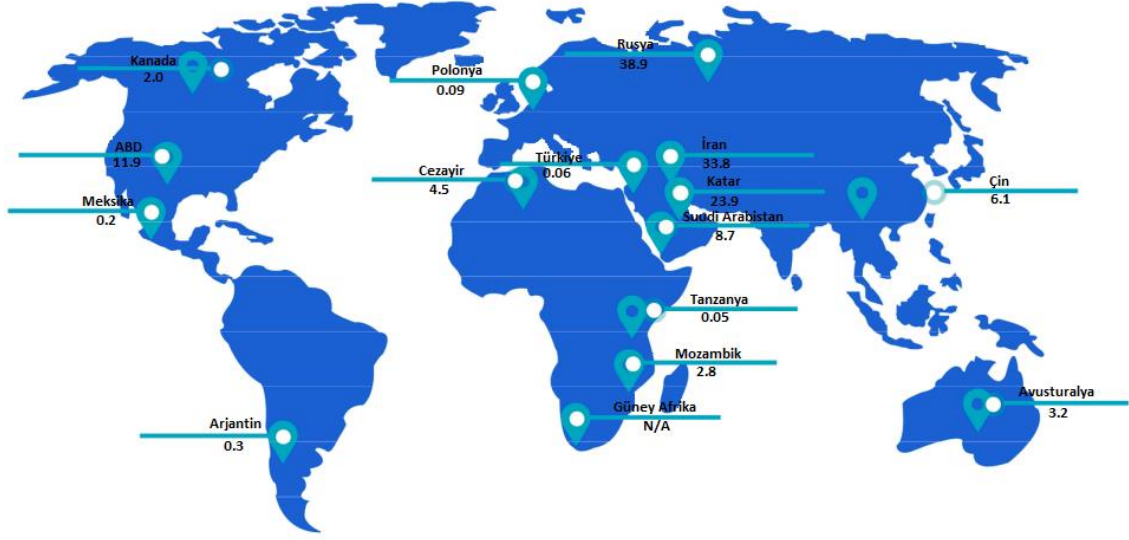
Doğalgaz, Dünya' nın enerji talebin karşılayan başlıca üyesi olmasıyla ve enerji kaynaklarının geneline bakıldığında kullanışlı, güvenilir ve temiz özellikleri ile adını öne çıkarmayı başarmıştır. Dünya ekonomisi düşük karbonlu enerjileri tercih ederken elektrik üretiminde yakıt olarak kullanılması ile de öne çıkmaktadır. Büyüyen şehirlerde gelişen ekonomiler için enerji ihtiyacı doğal gazı daha cazip kılmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)' na göre gaz tüketiminin elektrik üretimin kullanılacağı ve bundan dolayı bu tüketimin büyük oranda artacağını bildirmiştir. Doğal gaza olan talebin artması; yüksek ısıl verimlilik ve düşük yatırım maliyetleri gibi faydalar sağlarken, yenilenebilir enerji kaynaklarında oluşan üretim sorunlarını kararlı hale getirmeye fayda sağlamaktadır. Dünya gaz kaynağının yaklaşık 404 trilyon metreküp olduğu ve büyük bir kısmının Rusya, İran ve Katar gibi ülkelerde olduğu bilinmektedir (Bahadori 2014b).

Doğal gaz tedarik zincirinin önemli yapıtaşı taşımacılıktır. Sıvılaştırılmış Doğal Gaz ve boru hattı teknikleri en çok bilinen, karlı, ticari ve yetkin taşıma yöntemlerindedir. Boru hattının 1000 km'den kısa, LNG' nin 3500 km üzerindeki mesafelerde kullanılması daha karlıdır (Hassani Mokarram ve ark., 2020). Sera gazı emisyonlarını engellemek amacıyla, Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (LNG) geleneksel yakıtların yerine geçmekte ve hem araştırmacılar hem de sektör profesyonelleri tarafından giderek daha fazla talep görmektedir (Wang ve ark., 2024).

LNG, doğal gazın kriyojenik akışkan formuna denir ve soğutulmayla elde edilmektedir. Belirgin özellikleri aşındırıcı olmayan, kokusuz, renksiz, berrak ve toksik olmayan formunun olmasıdır (Hassani Mokarram ve ark., 2020). Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (LNG) endüstriyel, elektrik üretimi, konut ısıtmalarında ve kimyasal hammadde olarak birçok alanda kullanılma uygundur. Doğal gazın sıvılaştırma işlemi olarak bilinen LNG, -159 °C ile -162 °C sıcaklıkları arasında soğutma işleminin yapılması ile

depolanmaktadır (Bahadori 2014a). Kullanılmadan önce ısıtılıp sonrasında yeniden gazlaştırılması gerekmektedir.

Bu işlemler sonucunda soğuk enerji (830 kJ/kg civarı) meydana gelmektedir. Bu enerjinin ortama yayılması enerji kaybı oluşur ve çevreye zarar verir. Bu nedenle güç üretiminde soğuk enerjinin kullanılması, LNG' nin soğuk enerjisinden faydalanmanın en güçlü yöntemidir (Bayat ve ark., 2025). Dünya' da LNG nin dağılımı ile ilgili gösterim Şekil 1.1' deki gibidir.



Şekil 1.1. Dünya haritası üzerinde LNG dağılımının gösterimi (Wang ve ark., 2024)

LNG, hızlı buharlaşma özelliğine sahip olduğundan çevreyle temas ettiğinde patlayıcı bir madde olarak düşünülemez. Taşımacılık esnasında tankın devrilmesi ya da sızıntı gibi riskler teorik olarak bulunsa da bugüne kadar bu tür kazaların gerçekleştiğine dair kayıtlara ulaşamamıştır. Ayrıca LNG' nin dökülmesi durumunda fiziksel ve kimyasal özellikleri gereği ekstra temizlik işlemi gerektirmez. Buharlaşan LNG' nin hava ile karışması halinde ancak belirli bir konsantrasyon aralığında (%5-%15) yanıcı hale geldiği bilinmektedir. LNG' nin güvenliği ile ilgili tüm faktörler, ticari kullanımın başladığı ilk yıllardan itibaren birçok bilimsel araştırmalarda ele alınmıştır. Tüm bu bulgular, LNG' nin güvenilir bir doğal gaz taşıma yöntemi olduğunu desteklemektedir.

LNG' nin soğuk enerjisi, LNG buharlaştırıcılarında üretilir ve bu süreçteki gerekli olan özgül ısı, doğal gazın dağıtım basıncıyla doğrudan bağlantılıdır. Doğal gaz, çoğunlukla gaz fazında taşınırken uzun mesafeli iletim süreçlerinde süperkritik bölgede tercih edilmektedir. Bu durum, kritik sıcaklık ve basınç değerleri olan 190.56 K ve 45.99 bar seviyelerine dayanmaktadır. LNG, belirlenen basınca ulaşması için LNG pompaları aracılığıyla sıkıştırılır ve ardından faz değişiminin gerçekleştiği buharlaştırıcıya

yönlendirilir. Bu süreçte elde edilen soğuk enerji, sistem performansını etkileyen önemli bir parametredir.

LNG pompalarının çalışma verimi ve doğal gazın ihtiyaç duyduğu basınca bağlı olarak özgül iş gereksinimi değişkenlik gösterirken en düşük basınç seviyesinde elde edilen özgül enerji maksimuma ulaşır. Ancak büyük ölçekli sistemlerde, artan molar akış oranı nedeniyle LNG'nin soğuk enerjisinden daha verimli bir şekilde faydalanılabilir. Bununla birlikte, LNG'nin sadece soğuk enerjisi değil ekserji analizi kapsamında kayıplar ve yıkımlar da göz önünde bulundurularak değerlendirilmesi soğuk enerji kullanımına yönelik sistem tasarımı açısından daha faydalı bir yaklaşım sunmaktadır (Hassani Mokarram ve ark., 2020).

LNG, yukarıda da anlatıldığı gibi doğal gazın kriyojenik formu olup bu özellik sayesinde farklı sektörde çeşitli enerji çevrim süreçlerinde kullanılabilir. Petrokimya endüstrisinden suyun tuzdan arındırılması projelerine kadar geniş bir kullanım yelpazesine sahip olan LNG'nin soğuk enerjisi diğer fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında benzersiz bir avantaj sunmaktadır. Boru hattı doğal gazı kömür ve petrol gibi diğer ticari fosil yakıtlar kriyojenik özelliklere sahip olmadıkları için bu tür uygulamalar için uygun değildir. Bu durum, LNG'yi kriyojenik süreçlerde kullanılabilen en olgun ve ticari açıdan en avantajlı fosil yakıt haline getirmektedir. LNG'nin soğuk enerji potansiyeli ekonomik ve çevresel açıdan önemli tasarruflar sağlamaktadır. Örneğin; Jiang tarafından yapılan bir çalışmada, Çin'deki soğuk enerji kullanımının 2020 yılı itibarıyla 6.173 milyon ton CO₂ emisyonunu azaltabileceği ve bunun 2.3 milyon ton standart kömür tasarrufu anlamına geldiği belirtilmiştir. LNG'nin soğuk enerjisinin farklı sektörlerdeki uygulamaları aşağıda daha ayrıntılı olarak ele alınmaktadır (Hassani Mokarram ve ark., 2020).

Artan küresel temiz enerji talebi, enerji verimliliğini artırmaya yönelik yenilikçi teknolojileri ön plana çıkarmıştır. Bu teknolojiler arasında, jeotermal enerji kaynaklarıyla entegre edilen yeniden sıkıştırılmalı süperkritik karbondioksit (S-CO₂) çevrimleri, sürdürülebilir elektrik üretimi için etkili ve umut verici bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Sıvılaştırılmış doğal gazın (LNG) soğuk enerjisiyle birleştirildiğinde, bu tür sistemler önemli ekonomik ve operasyonel avantajlar sunabilir ve gelecekteki enerji sistemlerinde güçlü bir katkı unsuru haline gelebilir.

Jeotermal enerji, istikrarlı ve güvenilir enerji çıktısı sağlayan köklü bir yenilenebilir kaynaktır. Son gelişmeler, bu kaynağın S-CO₂ çevrimleriyle birlikte kullanıldığında artan potansiyelini vurgulamaktadır. Kompakt tasarımı ve yüksek termal verimliliği ile öne

çıkan S-CO₂ teknolojisi, geleneksel buhar çevrimlerine kıyasla üstün enerji dönüşümü sağlar (Ozen ve ark., 2020).

Jeotermal ısı kaynaklarının S-CO₂ çevrimleriyle entegrasyonunun enerji geri kazanımını artırabileceğini ve karbon azaltım çabalarına katkı sağlayarak daha sürdürülebilir bir enerji ekosistemini teşvik edebileceğini vurgulamaktadır. Benzer şekilde, (Habibollahzade ve ark., 2022) tarafından yürütülen analitik çalışma, jeotermal girdilerin, LNG yeniden gazlaştırması sırasında geri kazanılan soğuk enerji ile birleştirilmesinin termodinamik avantajlarını ortaya koymaktadır.

LNG'nin sıvılaştırma ve yeniden gazlaştırma süreçleri sırasında önemli miktarda enerji alışverişi gerçekleşir ve bu süreçlerde genellikle büyük miktarda soğuk enerji çevreye kaybedilir. Ancak, bu kriyojenik enerji elektrik üretimi için kullanılabilir ve sistem performansında dikkate değer iyileştirmelere yol açabilir (Kanbur ve ark., 2017). LNG soğuk enerjisiyle entegre edilen çok bileşenli Organik Rankine Çevrimi (ORC) sistemlerinin elektrik üretimini önemli ölçüde artırdığını bildirmiştir. Bulgularına göre, LNG'nin kriyojenik enerjisinin kullanılması sistem verimliliğini yaklaşık %12,6 oranında artırabilir. Benzer şekilde, (Lee ve ark., 2015) kademeli ORC sistemlerinin hem düşük sıcaklıklı atık ısıyı hem de LNG soğuk enerjisini etkili bir şekilde kullanarak enerji geri kazanımını artıran yenilikçi bir yaklaşım sunduğunu belirtmektedir.

LNG soğuk enerjisinin kullanımı, jeotermal entegreli sistemlerin verimliliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda sera gazı emisyonları gibi çevresel kaygılara da yanıt verir (Cao ve ark., 2021a). LNG'nin yeniden gazlaştırma sürecinde soğuk enerjisinin kullanılmasının atığı en aza indirerek ve LNG tedarik zinciri genelinde enerji kullanımını optimize ederek sürdürülebilir enerji üretimi fırsatları sunduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca, bu sistemlerin ekonomik uygulanabilirliği, mevcut altyapılarda verimli şekilde çalışabilmeleri sayesinde sermaye yatırımlarını ve işletme maliyetlerini azaltma kabiliyetleriyle desteklenmektedir (Fang ve ark., 2023).

Ayrıca, jeotermal kaynakların yeniden sıkıştırılmalı süperkritik CO₂ (S-CO₂) çevrim teknolojisiyle ve LNG yeniden gazlaştırması sırasında açığa çıkan soğuk enerjiyle entegrasyonu, enerji sistemlerinde yenilik potansiyeli açısından umut verici bir yaklaşım sunmaktadır. Bu tür entegre güç üretim yöntemleri, enerji sektörlerinin karbon ayak izini azaltmaya ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişi teşvik etmeye yönelik küresel stratejilerle güçlü bir uyum içindedir.

Sonuç olarak, jeotermal enerjiyle çalışan ve LNG soğuk enerjisiyle desteklenen yeniden sıkıştırılmalı S-CO₂ çevriminin performans analizi, sürdürülebilir enerji üretimi için ileri düzey bir mühendislik stratejisini temsil etmektedir.

İleri termodinamik çevrimlerin avantajlarından faydalanarak ve enerji geri kazanım verimliliğini artırarak bu entegre sistem, günümüz enerji sorunlarına yönelik etkili ve sürdürülebilir çözümler geliştirme konusunda önemli katkılar sunmaya adaydır. Bu çalışmada böyle bir sistem tasarlanmış ve termodinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Literatürde, ileri eksergo-ekonomik ve eksergo-çevresel analizlere odaklanan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Yapılan kapsamlı bir literatür taramasında, LNG soğuk enerjisi ile jeotermal enerjiyi entegre eden güç sistemlerine yönelik ileri eksergo-ekonomik ve eksergo-çevresel analizlerin bulunmadığı tespit edilmiştir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu çalışmada, jeotermal enerjiyi enerji kaynağı olarak ve LNG'nin soğuk enerjisini ısı kuyusu olarak kullanan yeniden sıkıştırılmalı S-CO₂ çevrimi tasarlanmış ve termodinamik analizler yürütülmüştür. Literatürde, ileri eksergo-ekonomik ve eksergo-çevresel analizlere odaklanan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Kapsamlı bir literatür taraması, LNG soğuk enerjisini ve jeotermal enerjiyi entegre eden güç sistemleri için ileri eksergo-ekonomik ve eksergo-çevresel analizlerin olmadığını ortaya koymuştur. Çizelge 2.1, literatürde önerilen sisteme benzer sistemlerde gerçekleştirilen termodinamik analizleri sınıflandırmakta ve ileri analiz teknikleri açısından literatürdeki boşluğun altını çizmektedir.

Çizelge 2.1. Literatürde, LNG-jeotermal sistemlerin geleneksel/ileri ekserji, eksergo-ekonomik ve eksergo-çevresel analizlerine ilişkin çalışmalar

Çalışma	GEA	GEKOA	GÇEVA	İEA	İEKOA	İÇEVA	Açıklamalar
(Almutairi 2023)	✓	✓	-	-	-	-	Bu çalışma, jeotermal kaynaklı çift çevrimli ORC ve LNG'nin buharlaştırma aşamalarının birleştiren bir enerji sistemini önermektedir. Sistemde LNG'nin soğuk enerjisi ve jeotermal enerjiden faydalanarak tatlı su, hidrojen ve elektrik üretimini amaçlamaktadır.
(Zhang ve ark., 2024)	✓	✓	-	-	-	-	Bu çalışma çoklu üretim sistemini önermektedir. Sistemde Kalina sistemi elektrik üretiminde çift etkili absorpsiyon soğutucu soğutma üretiminde kullanılmaktadır. LNG döngüsünde termal entegrasyon ve elektrik üretimini desteklemektedir.
(Xie ve ark., 2025)	✓	✓	-	-	-	-	Bu çalışma jeotermal enerji esaslı çoklu üretim sistemi önermektedir. Bu sistemde transkritik CO ₂ Rankine çevrimi ve LNG alt sistemini üst çerim, ejektör soğutma ve HDH tuzdan

							arındırma birimini alt çevrim olarak elektrik, hidrojen, soğutma ve tatlı su üretimini birleştirmektedir.
(Ghaebi ve ark., 2018)	✓	✓	-	-	-	-	Bu çalışma sıvılaştırılmış doğalgaz ve jeotermal kaynağın geri kazanımı esas alınarak kaskat kalina çevrimi tabanlı üretim sistemini önermektedir.
(Parikhani ve ark., 2019a)	✓	✓	-	-	-	-	Bu çalışma jeotermal kaynak tarafından tahrik edilen ve LNG soğuk enerjisi geri kazanımını kullanan çoklu üretim sisteminin eksergo-ekonomik analizinden bahsetmektedir.
(Lin ve ark., 2025)	✓	✓	-	-	-	-	Bu çalışma jeotermak kaynak ile çalışan ve LNG soğuk enerjisinin geri kazanımıyla birleştirilmiş çoklu üretim sistemini önermektedir.
(Ahmadi ve ark., 2016a)	✓	✓	-	-	-	-	Bu çalışmada LNG soğuk enerjisini geri kazanarak jeotermal kaynak ile çalışan transkritik CO ₂ güç çevrimini ele almaktadır. Sistem LNG' nin soğutma ortamı olarak görev yaptığı ve jeotermal akışkanın ısı kaynağı olarak kullanıldığı bir çevrim önermektedir.
(Ghorbani ve ark., 2020)	✓	-	-	-	-	-	Bu çalışmada Bio-LNG, tatlı su ve elektrik üretimi için güneş fotovoltaik ve jeotermal kaynakları kullanan çoklu bir sistemi önermektedir.
(Ansarinas ab ve ark., 2021)	✓	✓	✓	-	-	-	Bu çalışmada jeotermal enerji ve LNG soğuk enerjisini kullanan Kalina çevrimi, Stirling motoru, tuz arındırma ünitesi ve manyetik soğutma sistemini birleştiren yenilikçi bir sistem önermektedir.
(Wang ve ark., 2024)	-	✓	-	-	-	-	Bu çalışmada jeotermal ile çalışan, LNG buhar reformlama ve sentez

							gazı ile çalışan gaz türbinini birleştiren yenilikçi bir sistem önermektedir.
(Mondal ve ark., 2024)	✓	✓	-	-	-	-	Bu çalışmada transkritik CO ₂ güç çevrimini ve LNG gazlaştırma ünitesini bir araya getiren birleşik flaş-binary jeotermal çevrimini önermektedir.
(Mehrenjani ve ark., 2024)	✓	✓	-	-	-	-	Bu çalışmada, jeotermal enerji ile çalışan LNG' nin yeniden gazlaştırma sürecini termoelektrik üretim ile birleştiren çoklu üretim sistemi önerilmektedir.
(Sun ve ark., 2022)	✓	-	-	-	-	-	Bu çalışma, jeotermal enerji, LNG ve güneş enerjisini bir araya getiren ikili flaş, Kalina ve transkritik CO ₂ çevrimini önermektedir.
(You ve ark., 2025)	✓	✓	-	-	-	-	Bu çalışmada, jeotermal enerji ve LNG soğuk enerjisini birleştiren çoklu üretim sistemini önermektedir.
(Ghaebi ve ark., 2018)	✓	✓	-	-	-	-	Bu çalışmada, jeotermal kaynak ve LNG' nin soğuk enerji geri kazanımıyla çalışan trijenerasyon sistemi önerilmiştir. Önerilen sistemde ısıtma, soğutma ve elektrik üretimi sağlanmaktadır.
(Pan ve ark., 2023)	✓	✓	-	-	-	-	Bu çalışmada, LNG' nin soğuk enerjisi ile jeotermal enerjinin entegre çalıştığı dört çeşit elektrik üretim sistemi önerilmektedir. Önerilen sistem de ORC, LNG genişleme süreci ve jeotermal tek kademeli flaş çevrimi içermektedir.
(Mardan Dezfouli ve ark., 2024)	✓	✓	✓	-	-	-	Bu çalışmada, LNG' nin soğuk enerjisi ile jeotermal enerjiyi birleştiren üretim çevrimi önermektedir.
(Li ve ark., 2025)	✓	-	-	✓	-	-	Bu çalışmada, LNG' nin soğuk enerjisini geri

							kazanarak birleşik bir sistem geliştirmeyi önermektedir. Sistem de Rankine çevrimi, enjektör soğutma sistemi ve hidrojen üretim ünitesinden oluşmaktadır.
(Wang ve ark., 2014)	✓	-	-	-	-	-	Bu çalışmada, jeotermal enerji kullanarak transkritik CO ₂ çevrimle beraber elektrik üretmeyi amaçlamaktadır. Sistemde CO ₂ türbinin basıncını düşürmek için LNG kullanılmaktadır.
(Ahmadi ve ark., 2016b)	✓	-	-	-	-	-	Bu çalışmada, transkritik CO ₂ aracılığı ile jeotermal enerji kullanılarak elektrik üreten güç sistemi önerilmektedir.
(S. Sadaghiani ve ark., 2018)	✓	-	-	-	-	-	Bu çalışmada, jeotermal enerji ve LNG enerjileri kullanılarak yeni bir enerji santrali önerilmektedir.
(Mehdikhani ve ark., 2022)	✓	✓	-	-	-	-	Bu çalışmada, iki farklı basınç ve sıcaklıktaki jeotermal kaynak kullanımından bahsedilmektedir. Sistemde flaş konfigürasyonu, PEM (Proton Değişim Membranı) ORC ve LNG ünitelerinden oluşmaktadır.
(Khanmohammadi ve ark., 2023)	✓	✓	-	-	-	-	Bu çalışmada, ORC, KC (Kalina çevrimi) ve LNG' nin yeniden gazlaştırma yöntemini içeren jeotermal kaynak destekli karma güç üretim sistemi önerilmektedir.
(Ebadollahi ve ark., 2019)	✓	✓	-	-	-	-	Bu çalışmada, jeotermal kaynak kullanılarak hidrojen, elektrik üretimi, ısıtma ve soğutmayı birlikte yapmayı hedeflemektedir.
(Emadi ve ark., 2019)	✓	✓	-	-	-	-	Bu çalışmada, LNG' nin yeniden gazlaştırma yöntemini jeotermal enerji kaynaklı üretim sisteminde ısı alan

							olarak kullanarak enerji verimliliğini arttırmayı hedeflemektedir
(Mosaffa ve ark., 2017)	✓	✓	-	-	-	-	Bu çalışmada, LNG'nin soğuk enerjisini ve jeotermal enerjiyi kullanarak enerji üretimini arttıran birleşik güç çevrimini önermektedir.
(Wang ve ark., 2013)	✓	✓	-	-	-	-	Bu çalışma, jeotermal enerjiyi kullanarak elektrik, ısıtma, soğutma ve tuzdan arındırma ünitelerini içeren çoklu bir üretim sistemini önermektedir.
Bu Çalışma	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

Bu çalışma, LNG soğuk enerjisi ile jeotermal enerjiyi birleştiren bir güç sistemi için ileri eksergo-ekonomik ve eksergo-çevresel analizleri akademik literatürde ilk kez gerçekleştirmektedir.

Bu çalışmanın literatüre katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- LNG'nin soğuk enerjisini ve jeotermal enerji kullanan yeniden sıkıştırılmalı bir S-CO₂ çevrimi tasarlanmış ve sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlanmıştır.
- Enerji analizi (EA), geleneksel ekserji analizi (GEA), geleneksel eksergo-ekonomik analiz (GEKOA), geleneksel eksergo-çevresel analiz (GÇEVA) ve ileri ekserji analizi (İEA) kapsamlı şekilde gerçekleştirilmiştir.
- Literatürde bir ilk olarak, önerilen sistem için ileri eksergo-ekonomik analiz (İEKO) ve ileri eksergo-çevresel analiz (İÇEVA) yapılmıştır.
- İleri analizler için yeni performans kriterleri tanımlanmış ve sistem performansı ayrıntılı şekilde değerlendirilmiştir.
- Önerilen sistem için temel parametreler ve performans kriterleri belirlenmiş, duyarlılık analizi yapılmış ve NSGA-II yöntemi kullanılarak çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

Benzer çalışmalarda kullanılan farklı yöntemler ve yaklaşımlar aşağıdaki gibi sunulmuştur:

Yan Cao ve ark. (2020), jeotermal kaynakları kullanan entegre bir enerji dönüşüm sisteminin fizibilitesini inceledikleri çalışmalarında, sistemin enerji verimliliği, ekserji

verimliliği ve ekonomik performansını detaylı bir şekilde analiz etmişlerdir. Sistem, elektrik üretimi, ısıtma, soğutma ve hidrojen üretimi gibi çoklu enerji hizmetlerini bir arada sunmaktadır. Modifiye edilmiş özgül ekserji maliyeti (MSPECO) yöntemi kullanılarak yapılan analizler, sistemin yüksek enerji verimliliği ve düşük ekserji kaybı sağladığını göstermektedir. Optimizasyon çalışmaları ise sistemin ekonomik ve çevresel açıdan da verimli olduğunu ortaya koymuştur (Cao ve ark., 2021b).

Yousef ve ark. (2024), süperkritik CO₂ Brayton çevrimi ile LNG regazifikasyonunu entegre eden sürdürülebilir bir çoklu üretim sisteminin termodinamik ve eksergo-ekonomik analizlerini sunmuşlardır. Sistem, elektrik üretimi, soğutma, ısıtma ve hidrojen üretimini aynı anda sağlamaktadır. Enerji, ekserji ve eksergo-ekonomik analizler ile sistem performansı kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiş ve duyarlılık analizi ile ana parametrelerin etkileri incelenmiştir. Temel senaryoda, sistem enerji ve ekserji verimlilikleri sırasıyla %62.79 ve %54.89, ürün birim maliyeti ise 11.35 \$/GJ olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma, LNG'nin soğuk enerjisinin etkin bir şekilde kullanılması ve çoklu enerji üretiminin entegrasyonu açısından literatüre önemli katkılar sunmaktadır (Yousef ve ark., 2024).

Fang ve ark. (2023), sıvılaştırılmış doğal gazın (LNG) soğuk enerjisinin etkin bir şekilde kullanılmasını amaçlayan yenilikçi bir birleşik soğutma, ısıtma ve güç (CCHP) sisteminin termodinamik, eksergo-ekonomik ve eksergo-çevresel analizlerini sunmuşlardır. Sistemin performansı, ORC-I çalışma sıvısının kütle debisi, türbin 1 giriş sıcaklığı, kompresör ve pompa çıkış basıncı ile türbinlerin izentropik verimliliği gibi parametrelerin etkisiyle incelenmiştir. Ayrıca, sistemin çoklu hedefli optimizasyonu için sırasıyla NSGA-II ve PSO algoritmaları kullanılmıştır. Optimizasyon sonuçları, PSO'nun bu yeni CCHP sisteminin çoklu hedefli optimizasyonunda NSGA-II'ye göre üstün olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, sırasıyla %70.20 ekserji verimliliği, 21.50 \$/GJ ürün birim maliyeti ve 57.91 mPts/GJ ürün birim çevresel etkisi ile elde edilmiştir (Fang ve ark., 2023).

Mosaffa ve ark. (2017), farklı ORC konfigürasyonlarıyla entegre edilmiş jeotermal enerji santralleri ve LNG soğuk enerjisinin birleşik kullanımının termodinamik ve eksergo-ekonomik analizini sunmuşlardır. Sistem, jeotermal kaynaklardan elde edilen atık ısının ORC çevrimleriyle elektrik üretimi için kullanılması ve LNG'nin soğuk enerjisinin buharlaştırma ve soğutma süreçlerinde değerlendirilmesi prensibine dayanmaktadır. Analizler, sistemin enerji verimliliği, ekserji verimliliği, ürün birim maliyeti ve çevresel etkileri gibi performans göstergeleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar, LNG soğuk enerjisinin etkin kullanımıyla sistemin genel verimliliğinde önemli iyileşmeler sağlandığını göstermektedir (Mosaffa ve ark., 2017).

Özen ve Koçak (2022), LNG'nin soğuk enerjisinden faydalanan yeni bir birleşik güç sisteminin enerji, ekserji ve eksergo-ekonomik analizlerini sunmuşlardır. Sistemin tasarımında, LNG'nin soğuk enerjisinin etkin bir şekilde kullanılması hedeflenmiştir. Geleneksel ve ileri düzey ekserji analizleriyle birlikte, ilk kez Modifiye Üretken Yapı Analizi (MOPSA) yöntemi kullanılarak eksergo-ekonomik analiz gerçekleştirilmiştir. Analizler, sistemin enerji verimliliği, ekserji verimliliği ve ekonomik performansını değerlendirmiştir. Sonuçlar, sistemin LNG'nin soğuk enerjisinden etkin bir şekilde faydalandığını ve potansiyel olarak enerji üretiminde önemli iyileşmeler sağladığını göstermektedir (Özen ve ark., 2022).

Pan ve ark. (2023), sıvılaştırılmış doğal gazın (LNG) soğuk enerjisi ile jeotermal enerjiyi entegre eden dört farklı güç üretim sisteminin enerji, ekserji ve ekonomik analizlerini sunmuşlardır. Sistemler, jeotermal tek flaş çevrimi, LNG genişleme süreci ve organik Rankine çevrimi (ORC) içermektedir. Farklı matematiksel modeller kullanılarak sistemler, kararlı durum koşulları altında simüle edilmiştir. Anahtar çalışma parametrelerinin enerji verimliliği, ekserji verimliliği ve enerji başına düzelen maliyet (LCOE) üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, ayırıcı basınç, LNG türbini ve Rankine türbini giriş basınçlarının artırılmasının enerji ve ekserji verimliliklerini artırabileceğini göstermektedir. Ayrıca, daha yüksek LNG türbini çıkış basıncı, daha yüksek LCOE'ye yol açmaktadır. En iyi sistem performansını elde etmek için tek ve çok amaçlı genetik algoritma (GA) tabanlı optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Tek amaçlı optimizasyonla, GSF-TSORC ve GSF-TPORC sırasıyla %34.80 ve %52.61 enerji ve ekserji verimliliklerine ulaşabilirken, GSFC en düşük toplam maliyet oranı olan $0.326 \text{ M}\$ \cdot \text{yıl}^{-1}$ 'e sahiptir.

Çok amaçlı optimizasyon sonrası, GSF-TPORC'nin enerji ve ekserji verimlilikleri sırasıyla %29.56 ve %51.29 olup, diğer üç sistemden üstün olup, ekonomik açıdan GSF-ORC en düşük LCOE'ye sahip olup, en iyi sistem olarak değerlendirilmiştir (Pan ve ark., 2023).

Parikhani ve ark. (2019), jeotermal ısı kaynağı ve LNG soğuk enerjisini kullanarak güç, ısıtma, soğutma ve hidrojen üretimi sağlayan yeni bir çoklu üretim sisteminin enerji, ekserji ve eksergo-ekonomik analizlerini sunmuşlardır. Sistem, çift organik Rankine çevrimi (ORC) ve PEM elektrolizör kullanarak LNG'nin buharlaştırılmasını ve hidrojen üretimini hedeflemektedir. Genetik algoritma (GA)

kullanılarak tek ve çok amaçlı optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Optimum çalışma koşullarında, sistemin termal verimliliği %62.74, ekserji verimliliği %33.82 ve toplam ürün birim maliyeti (SUCP) 125.4 \$/GJ olarak hesaplanmıştır. Parametrik çalışmalar, buhar jeneratörü basıncı ve buharlaştırıcı sıcaklığının artırılmasının termal verimliliği artırabileceğini, ancak diğer parametrelerin azaltılmasının daha yüksek verimlilik sağladığını göstermektedir (Parikhani ve ark., 2019b).

Nami ve ark. (2019), jeotermal ısı kaynağı ve LNG soğuk enerjisini kullanarak güç, ısıtma, soğutma ve hidrojen üretimi sağlayan yeni bir çoklu üretim sisteminin enerji, ekserji ve eksergo-ekonomik analizlerini sunmuşlardır. Sistem, çift organik Rankine çevrimi (ORC) ve PEM elektrolizör kullanarak LNG'nin buharlaştırılmasını ve hidrojen üretimini hedeflemektedir. Genetik algoritma (GA) kullanılarak tek ve çok amaçlı optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Optimum çalışma koşullarında, sistemin termal verimliliği %62.74, ekserji verimliliği %33.82 ve toplam ürün birim maliyeti (SUCP) 125.4 \$/GJ olarak hesaplanmıştır. Parametrik çalışmalar, buhar jeneratörü basıncı ve buharlaştırıcı sıcaklığının artırılmasının termal verimliliği artırabileceğini, ancak diğer parametrelerin azaltılmasının daha yüksek verimlilik sağladığını göstermektedir (Nami ve ark., 2017).

Aryanfar ve ark. (2023), SFGC atık ısısının ve LNG'nin soğuk enerjisinin değerlendirilmesi amacıyla iki kademeli ORC sisteminin enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Üç farklı sistem konfigürasyonu incelenmiştir: yalnızca SFGC, SFGC ile entegre edilmiş iki kademeli ORC ve SFGC ile entegre edilmiş iki kademeli ORC ile LNG soğuk enerjisi geri kazanımı. İki kademeli ORC sisteminde R227ea/R116 ve R124/R125 akışkan çiftleri kullanılmıştır. Termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları kullanılarak yapılan analizler, R227ea/R116 akışkanlarıyla enerji verimliliğinin %20.23'ten %38.63'e yükseldiğini; R124/R125 akışkanlarıyla ise %40.16'dan %40.66'ya çıktığını göstermiştir. Bu sonuçlar, LNG'nin soğuk enerjisinin ve SFGC atık ısısının entegre bir sistemle değerlendirilmesinin enerji ve ekserji verimliliğini artırabileceğini ortaya koymaktadır (Aryanfar ve ark., 2023).

Zhao ve ark. (2020), LNG'nin yeniden gazlaştırma sürecinde açığa çıkan soğuk enerjinin etkin kullanımını hedefleyen yenilikçi bir sistem tasarlamış ve bu sistemin dinamik ekserji analizini gerçekleştirmiştir. Önerilen sistem, bir gaz türbini, dört Rankine çevrimi ve doğrudan genleşme ünitesini entegre ederek hem soğutma hem de elektrik üretimi sağlamaktadır. Çalışmada, LNG yeniden gazlaştırma basıncı ve hava giriş sıcaklığı gibi parametrelerin sistem performansına etkileri incelenmiştir. Güney Çin'de

bulunan tipik bir otel üzerine yapılan vaka çalışması, önerilen sistemin geleneksel birleşik soğutma, ısıtma ve güç (CCHP) sistemlerine kıyasla daha yüksek Güç/Soğuk ve Isı/Soğuk oranlarına sahip olduğunu göstermiştir; bu oranlar sırasıyla 5.55 ve 3.65 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, sistemin ekserji verimliliği belirli koşullarda %48.97'ye ulaşmıştır. Ancak, LNG'nin yeniden gazlaştırma basıncının belirli bir aralıkta olması durumunda sistem ekserji verimliliğinde keskin bir düşüş gözlemlenmiştir. Önerilen sistem, düşük atmosferik sıcaklıklarda daha yüksek ekserji verimliliği sergilemektedir (Zhao ve ark., 2020).

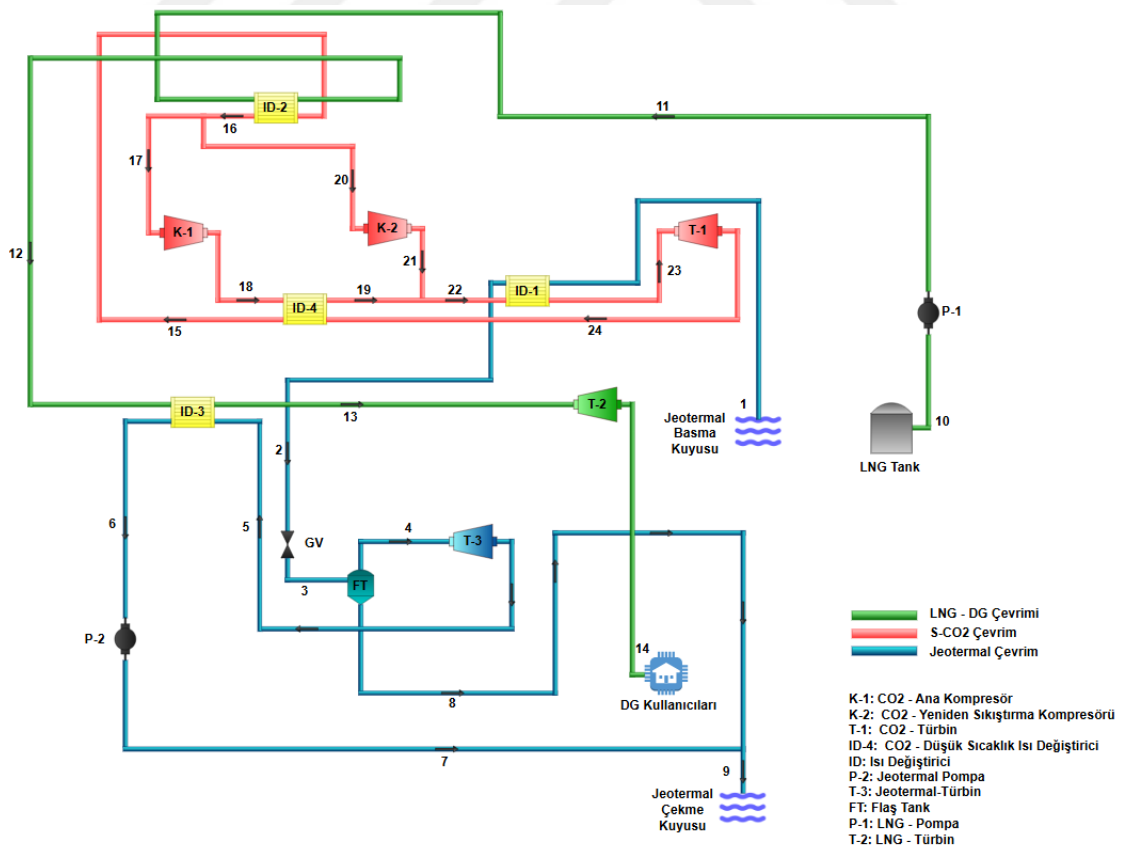
Pan ve ark. (2024), güneş enerjisi ve LNG'nin soğuk enerjisinden faydalanan yenilikçi bir birleşik güç sistemi tasarlamışlardır. Sistem, süperkritik CO₂ yeniden sıkıştırılmalı Brayton çevrimi ile Kalina çevrimini entegre ederek hem yüksek hem de düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarını etkin bir şekilde kullanmayı hedeflemektedir. Sistemin enerji, ekserji ve eksergoekonomik performansları analiz edilmiş; karar değişkenlerinin seçimi için parametrik bir analiz gerçekleştirilmiştir. Optimum çalışma koşullarını belirlemek amacıyla Genetik Algoritma (GA) ve Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) kullanılmıştır. Pareto ön yüzleri ve LINMAP yöntemiyle belirlenen optimal nokta analiz edilmiştir (Pan ve ark., 2024).

Özen ve Uçar (2019), Marmara Ereğlisi'ndeki BOTAŞ LNG alım terminali için, LNG'nin soğuk enerjisinden faydalanan yenilikçi bir birleşik güç sistemi tasarlamışlardır. Sistem, ana çevrim olarak Brayton çevrimini, alt çevrimler olarak ise süperkritik CO₂ çevrimi (S-CO₂) ve Organik Rankine Çevrimi'ni (ORÇ) içermektedir. Çalışmada, sistemin enerji, ekserji ve eksergo-ekonomik analizleri gerçekleştirilmiş; kompresör ve türbin izentropik verimleri, CO₂ çevrimi basınç oranı, ORÇ basınç oranı ve propan kütle debisi gibi karar değişkenlerinin sistem performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Optimizasyon sonuçlarına göre, sistemin toplam maliyetinde %67'lik bir azalma sağlanmıştır (Ozen ve ark., 2020).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Şekil 3.1, önerilen sistemin şematik gösterimini sunmaktadır. Önerilen güç sistemi, jeotermal enerjiyi ısı kaynağı ve LNG'nin soğuk enerjisini ısı kuyusu olarak kullanılan, yeniden sıkıştırılmalı bir S-CO₂ çevrimi ile tek genişlemeli bir jeotermal güç çevriminden oluşan birleşik bir güç sistemidir. Önerilen güç sisteminin çalışma senaryosu şu şekildedir: CO₂ ana kompresörüne (K-1) ve yeniden sıkıştırma kompresörüne (K-2) girmeden önce, akış-17 ve akış-20; akış-11-12 vasıtasıyla Isı Değiştirici-2 (ID-2)'de, LNG'nin soğuk enerjisi kullanılarak ön soğutmaya tabi tutulur. Bu işlem, kompresörlerdeki güç tüketimini azaltmak amacıyla yapılmaktadır. K-1'de sıkıştırılan akış-18, CO₂ düşük sıcaklık rekuperatörüne (ID-4) girer ve burada CO₂ türbininden (T-1) gelen akış-24 tarafından ısıtılır. ID-4'te çıkan akış-19, K-2'den çıkan akış-21 ile karıştırılarak sıcaklığı artırılır. Oluşan akış-22, Isı Değiştirici-1'e (ID-1) girer ve burada jeotermal enerji kullanılarak akış-1-2 tarafından ısıtılır.

ID-1'den çıkan akış-23'ün CO₂ türbininde (T-1) genişmesi ile elektrik enerjisi üretilir. Böylece S-CO₂ çevrimi tamamlanmış olur.



Şekil 3.1. Jeotermal kaynak, süperkritik karbondioksit ve LNG' nin soğuk enerjisini kullanan birleşik güç sisteminin şematik gösterimi

- Sistem bileşenleri kontrol hacmi olarak kabul edilmiş ve kararlı durumda çalıştıkları varsayılmıştır.
- Sistem bileşenlerinde ve bu bileşenleri birbirine bağlayan borulardaki ısı ve basınç kayıpları ihmal edilmiştir.
- Kinetik enerji ile potansiyel enerji/ekserji değişimleri ihmal edilmiştir.
- LNG, metan olarak kabul edilmiştir. (Mosaffa ve ark., 2017)
- Jeotermal su, saf sıvı su olarak alınmıştır. (Ebadollahi ve ark., 2019)

Sistemin uygun simülasyon koşulları Çizelge 3.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Önerilen sistemin simülasyon koşulları

Çevrim	Parametre	Sembol	Değer
Çevre Koşulları	Ölü Durum Sıcaklığı	T_0	15 °C (Chen ve ark., 2025)
	Ölü Durum Basıncı	P_0	101.3 kPa (Chen ve ark., 2025)
Jeotermal Çevrim	Jeotermal Akışkanın Kütle Akış Hızı	$\dot{m}_{jeotermal}$	285 kg.s ⁻¹ (Cavalcanti 2017a)
	Jeotermal Akışkanın Giriş Sıcaklığı	T_1	200 °C (Dutta ve ark., 2018)
	Jeotermal Akışkanın Giriş Basıncı	P_1	1600 KPA (Pan ve ark., 2024)
	Isı Değiştirici Sıcaklık Farkı, ID-1	ΔT_{ID-1}	10 °C (Khoshgoftar Manesh ve ark., 2013)
	Türbin Basınç Oranı	P_{R-Jeo}	3
	Flaş Tankı Flaş Basıncı	P_3	300 kPa (Muhammad ve ark., 2021)
	Pompa İzentropik Verimi	η_{pompa}	85 % (Mondal ve ark., 2024)
	Türbin İzentropik Verimi	$\eta_{türbin}$	85 % (Mondal ve ark., 2024)
	Kompresör Giriş Basıncı	P_{17}	7400 kPa (Hu ve ark., 2024)
	Kompresör Giriş Sıcaklığı	T_{17}	308.15 K (Hu ve ark., 2024)
S-CO2 Çevrim	Kompresör ve Türbin Basınç Oranı	P_{R-SO2}	2
	Kompresör İzentropik Verimliliği	η_{K-1}, η_{K-2}	84 % (Mardan Dezfouli ve ark., 2024)
	Türbin İzentropik Verimliliği	η_{T-1}	84 % (Mardan Dezfouli ve ark., 2024)
	Isı Değiştirici Sıcaklık Farkı, ID-4	ΔT_{ID-4}	10 °C (Özen 2024)
LNG Çevrim	LNG’ nin Pompa Giriş Sıcaklığı	T_{10}	-161 °C (Ahmadi ve ark., 2017)
	LNG’ nin Pompa Giriş Basıncı	P_{10}	7000 kPa (Cavalcanti 2017a)
	LNG’ nin Kütle Akış Hızı	\dot{m}_{LNG}	150 t/h (Atienza-Márquez ve ark., 2019)
	Pompa İzentropik Verim	η_{pompa}	85 % (Hassani Mokarram ve ark., 2020)
	Türbin İzentropik Verim	$\eta_{türbin}$	80 % (Cavalcanti 2017a)
	Isı Değiştirici Basınç Farkı, ID-2	ΔP_{ID}	5 % (Kwak ve ark., 2020)
	Isı Değiştirici Sıcaklık Farkı, ID-3	$\Delta T = T_{5-} - T_{13}$	10 °C (Özen ve ark., 2024)
	Türbin Basınç Oranı	$P_{R-LNG-Türbin}$	3
	Pompa Basınç Oranı	$P_{R-LNG-Pompa}$	3

3.2. Güç Sisteminin Termodinamik Analizi

Termodinamik sistemlerin performansını değerlendirmek için kütle, enerji ve ekserji analizleri temel araçlardır. Kütle analizi, sistemdeki akışkanın giriş ve çıkışlarını kontrol ederek sistemdeki kütle korunumunun sağlandığını gösterir.

Enerji analizi, enerji korunum yasasını esas alarak sistemdeki enerji giriş ve çıkışlarını inceleyerek enerji dönüşümlerini belirler. Ancak enerji analizinde miktarı gösterirken enerji kalitesini göz ardı eder. Bu noktada, ekserji analizi enerjinin kullanılabilirliğini değerlendirir. Ekserji bir enerji kaynağının çevresiyle dengeye gelene kadar yapabileceği yararlı işin miktarıdır. Termodinamik analizler sistemin performansı hakkında sağlıklı sonuçlara ulaşabilmemize olanak sağlar.

Hedeflenen birleşik güç sisteminin enerji ve kütle korunum denklemleri aşağıdaki gibidir;

$$\sum \dot{m}_{\text{giren}} - \sum \dot{m}_{\text{çıkan}} = 0 \quad (3.1)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum(\dot{m}h)_{\text{çıkan}} - \sum(\dot{m}h)_{\text{giren}} \quad (3.2)$$

Sistem bileşenlerinin enerji ve yardımcı denklemleri aşağıda verilmiştir.

Kompresör K-1 için;

$$\dot{W}_{K-1} = \dot{m}_{17}(h_{18} - h_{17}) \quad (3.3)$$

$$\eta_{K-1} = \frac{h_{18s} - h_{17}}{h_{18} - h_{17}} \quad (3.4)$$

Kompresör K-2 için;

$$\dot{W}_{K-2} = \dot{m}_{20}(h_{21} - h_{20}) \quad (3.5)$$

$$\eta_{K-2} = \frac{h_{21s} - h_{20}}{h_{21} - h_{20}} \quad (3.6)$$

Türbin T-1 için;

$$\dot{W}_{T-1} = \dot{m}_{23}(h_{23} - h_{24}) \quad (3.7)$$

$$\eta_{T-1} = \frac{h_{23} - h_{24}}{h_{23} - h_{24s}} \quad (3.8)$$

Türbin T-2 için;

$$\dot{W}_{T-2} = \dot{m}_{13}(h_{13} - h_{14}) \quad (3.9)$$

$$\eta_{T-2} = \frac{h_{13} - h_{14}}{h_{13} - h_{14s}} \quad (3.10)$$

Türbin T-3 için;

$$\dot{W}_{T-3} = \dot{m}_4(h_4 - h_5) \quad (3.11)$$

$$\eta_{T-3} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5s}} \quad (3.12)$$

Pompa P-1 için;

$$\dot{W}_{P-1} = \dot{m}_{10}(h_{10} - h_{11}) \quad (3.13)$$

$$\eta_{P-1} = \frac{h_{10s} - h_{11}}{h_{10} - h_{11}} \quad (3.14)$$

Pompa P-2 için;

$$\dot{W}_{P-2} = \dot{m}_6(h_7 - h_6) \quad (3.15)$$

$$\eta_{P-2} = \frac{h_{7s} - h_6}{h_7 - h_6} \quad (3.16)$$

Flaş Tankı FT için;

$$\dot{m}_3 \cdot h_3 = \dot{m}_4 \cdot h_4 + \dot{m}_8 \cdot h_8 \quad (3.17)$$

Isı Değiştirici ID-1 için;

$$\dot{W}_{ID-1} = \dot{m}_2(h_2 - h_1) \quad (3.18)$$

$$\dot{W}_{ID-1} = \dot{m}_{23}(h_{23} - h_{22}) \quad (3.19)$$

Isı Değiştirici ID-2 için;

$$\dot{W}_{ID-2} = \dot{m}_{12}(h_{12} - h_{11}) \quad (3.20)$$

$$\dot{W}_{ID-2} = \dot{m}_{17}(h_{17} - h_{16}) \quad (3.21)$$

Isı Değiştirici ID-3 için;

$$\dot{W}_{ID-3} = \dot{m}_6(h_6 - h_5) \quad (3.22)$$

$$\dot{W}_{ID-3} = \dot{m}_{14}(h_{14} - h_{13}) \quad (3.23)$$

Isı Değiştirici ID-4 için;

$$\dot{W}_{ID-4} = \dot{m}_{19}(h_{19} - h_{18}) \quad (3.24)$$

$$\dot{W}_{ID-4} = \dot{m}_{15}(h_{15} - h_{24}) \quad (3.25)$$

Genleşme Valfi GV için;

$$\dot{m}_2 \cdot h_2 = \dot{m}_3 \cdot h_3 \quad (3.26)$$

3.3. Ekserji Analizi

Sistem parametrelerinin iyileştirme potansiyelinin analizi için ekserji analizi uygulanmıştır. Ekserji, sistemin çevre ile dengeye gelmesi sonucunda sistemin iş yapma potansiyelini belirten termodinamik ifadeye denir. Başka bir ifade ile Klasik termodinamik ile termodinamiğin ikinci yasası bir bütünleştiğinde sadece enerji iletkenin termodinamik özellikleri değil aynı zamanda termodinamik kayıpları ve eksiklikleri de göz önünde bulundurularak bir enerji dengesinin tamamlanmasını ve geliştirmesini sağlar. Bu yüzden ekserji analizi uygulanarak sistemdeki etkinlik kayıplarının boyutu ve konumu belirlenecek ve bunların kaçınılıp kaçınılamayacağı değerlendirilecektir (Ansarinasab ve ark., 2021; Fallah ve ark., 2022).

3.3.1. Geleneksel ekserji analizi

Sistem unsurlarının iyileştirme potansiyelini gösteren analiz ölçütü olan ekserji yıkımı bileşenin yakıt ekserjisi ile ürün ekserjisi arasındaki fark olarak tanımlanır. Sistem bileşenlerinin ekserji yıkımı iki şekilde bulunur.

İlk yöntemde ekserji yıkımı ($\dot{E}x_{D,k}$) sistemden çıkan ekserji akımlarının sisteme giren ekserji akımlarından çıkarılmasıyla bulunur. İkinci yöntem, sistemin yakıt (besleme) ekserjisinden ($\dot{E}x_{f,k}$) ürün ekserjisinin ($\dot{E}x_{p,k}$) çıkarılmasıyla bulunur. Bu çalışmada ikinci yöntem tercih edilmiştir.

$$\dot{E}x_{D,k} = \dot{E}x_{f,k} - \dot{E}x_{p,k} \quad (3.27)$$

Yukarıdaki ifadede $\dot{E}x_{f,k}$ yakıt enerjisi. $\dot{E}x_{p,k}$ ürün ekserjisini ifade eder.

$$\dot{E}x_{ph} = \dot{m}(h(T, P) - h(T_0, P_0) - T_0[s(T, P) - s(T_0, P_0)]) \quad (3.28)$$

Aşağıdaki verilen denklemlerde analizi yapılan birleşik güç sisteminin her bileşeni için ekserji yıkımı denklemleri verilmiştir; (Jovijari ve ark., 2023)

Kompresör K-1 için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,K-1} = \dot{W}_{K-1} \quad (3.29)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,K-1} = \dot{E}x_{18} - \dot{E}x_{17} \quad (3.30)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{DK-1} = \dot{W}_{K-1} - (\dot{E}x_{18} - \dot{E}x_{17}) \quad (3.31)$$

Kompresör K-2 için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,K-2} = \dot{W}_{K-2} \quad (3.32)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,K-2} = \dot{E}x_{21} - \dot{E}x_{20} \quad (3.33)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{DK-2} = \dot{W}_{K-2} - (\dot{E}x_{21} - \dot{E}x_{20}) \quad (3.34)$$

Türbin T-1 için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,T-1} = \dot{E}x_{23} - \dot{E}x_{24} \quad (3.35)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,T-1} = \dot{W}_{T-1} \quad (3.36)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{DT-1} = (\dot{E}x_{23} - \dot{E}x_{24}) - \dot{W}_{T-1} \quad (3.37)$$

Türbin T-2 için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,T-2} = \dot{E}x_{13} - \dot{E}x_{14} \quad (3.38)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,T-2} = \dot{W}_{T-2} \quad (3.39)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{DT-2} = (\dot{E}x_{13} - \dot{E}x_{14}) - \dot{W}_{T-2} \quad (3.40)$$

Türbin T-3 için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,T-3} = \dot{E}x_4 - \dot{E}x_5 \quad (3.41)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,T-3} = \dot{W}_{GT} \quad (3.42)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{DGT} = (\dot{E}x_4 - \dot{E}x_5) - \dot{W}_{GT} \quad (3.43)$$

Pompa P-1 için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,P-1} = \dot{W}_{P-1} \quad (3.44)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,P-1} = \dot{E}x_{11} - \dot{E}x_{10} \quad (3.45)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{DP-1} = \dot{W}_{P-1} - (\dot{E}x_{11} - \dot{E}x_{10}) \quad (3.46)$$

Pompa P-2 için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,P-2} = \dot{W}_{P-2} \quad (3.47)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,P-2} = \dot{E}x_7 - \dot{E}x_6 \quad (3.48)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{DP-2} = \dot{W}_{P-2} - (\dot{E}x_7 - \dot{E}x_6) \quad (3.49)$$

Flaş Tankı FT için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,FT} = \dot{E}x_3 \quad (3.50)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,FT} = \dot{E}x_4 + \dot{E}x_5 \quad (3.51)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{DFT} = \dot{E}x_3 - (\dot{E}x_4 + \dot{E}x_5) \quad (3.52)$$

Isı Değiştirici ID-1 için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,ID-1} = \dot{E}x_2 - \dot{E}x_1 \quad (3.53)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,ID-1} = \dot{E}x_{23} - \dot{E}x_{22} \quad (3.54)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{DID-1} = (\dot{E}x_2 - \dot{E}x_1) - (\dot{E}x_{23} - \dot{E}x_{22}) \quad (3.55)$$

Isı Değiştirici ID-2 için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,ID-2} = \dot{E}x_{12} - \dot{E}x_{11} \quad (3.56)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,ID-2} = \dot{E}x_{17} - \dot{E}x_{16} \quad (3.57)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{DID-2} = (\dot{E}x_{12} - \dot{E}x_{11}) - (\dot{E}x_{17} - \dot{E}x_{16}) \quad (3.58)$$

Isı Değiştirici ID-3 için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,ID-3} = \dot{E}x_6 - \dot{E}x_5 \quad (3.59)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,ID-3} = \dot{E}x_{13} - \dot{E}x_{12} \quad (3.60)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{DID-3} = (\dot{E}x_6 - \dot{E}x_5) - (\dot{E}x_{13} - \dot{E}x_{12}) \quad (3.61)$$

Isı Değiştirici ID-4 için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,ID-4} = \dot{E}x_{19} - \dot{E}x_{18} \quad (3.62)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,ID-4} = \dot{E}x_{15} - \dot{E}x_{24} \quad (3.63)$$

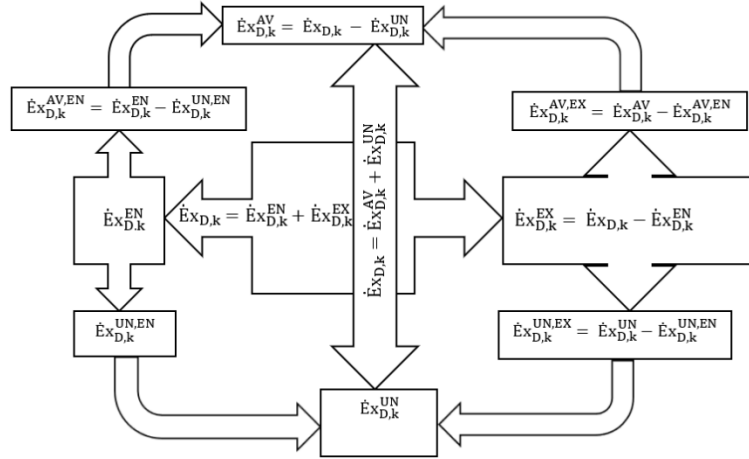
$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{DCTR} = (\dot{E}x_{19} - \dot{E}x_{18}) - (\dot{E}x_{15} - \dot{E}x_{24}) \quad (3.64)$$

3.3.2. İleri ekserji analizi

İleri ekserji analizi, sistem bileşenlerindeki ekserji yıkımının kaynağı hakkında geleneksel ekserji analizine kıyasla daha detaylı bilgi sunar. Bu çalışmada, Şekil 3.1’de gösterilen birleşik güç sistemine ileri ekserji analizi uygulanmıştır. Çünkü bu analiz türünde ekserji yıkımı; içsel ($\dot{E}x_{D,k}^{EN}$), dışsal ($\dot{E}x_{D,k}^{EX}$), kaçınılmaz ($\dot{E}x_{D,k}^{UN}$) ve kaçınılabılır ($\dot{E}x_{D,k}^{AV}$) olmak üzere dört bileşene ayrılarak değerlendirilmektedir. (Mehdikhani ve ark., 2022)

Ayrıca, kaçınılabılır ve kaçınılmaz ekserji yıkımı da içsel ($\dot{E}x_{D,k}^{AV,EN}$, $\dot{E}x_{D,k}^{UN,EN}$) ve dışsal ($\dot{E}x_{D,k}^{AV,EX}$, $\dot{E}x_{D,k}^{UN,EX}$) olarak ayrılabilir. Bu yaklaşım, sistem bileşenindeki toplam ekserji yıkımının kaynağını daha ayrıntılı şekilde ortaya koyar. Ekserji yıkımının kaynağı; bileşenin kendisinden kaynaklanan etkiler ($\dot{E}x_{D,k}^{EN}$, $\dot{E}x_{D,k}^{AV,EN}$, $\dot{E}x_{D,k}^{UN,EN}$), diğer sistem bileşenleriyle olan etkileşimler ($\dot{E}x_{D,k}^{EX}$, $\dot{E}x_{D,k}^{AV,EX}$, $\dot{E}x_{D,k}^{UN,EX}$) ve teknolojik sınırlamalar ($\dot{E}x_{D,k}^{UN}$, $\dot{E}x_{D,k}^{UN,EN}$, $\dot{E}x_{D,k}^{UN,EX}$) şeklinde üç ana başlık altında değerlendirilebilir. Bu sayede, sistemdeki ekserji yıkımının nedenleri daha net anlaşılır ve iyileştirme yapılacak noktalar daha etkin biçimde belirlenebilir.

Ekserji yıkımının bölümlerinin hesaplanmasını sağlayan denklemler Şekil 3.3.’te verilmiştir.



Şekil 3.3. $\dot{E}x_{D,k}$ bölümlerini elde etmek için kullanılan denklemler (Liu ve ark., 2020)

Her bileşen için gerçek, ideal ve kaçınılmaz koşulları Çizelge 3.2’ de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Sistem bileşenlerinin gerçek, ideal ve kaçınılmaz koşulları (Açıkkalp ve ark., 2014; Bahadori 2014b; Ebadollahi ve ark., 2019; Emadi ve ark., 2019; Ghaebi ve ark., 2018; Ghaebi ve ark., 2018; Habibi ve ark., 2018; Habibollahzade ve ark., 2022; Hassani Mokarramve ark., 2020; Hu ve ark., 2024; Kwak ve ark., 2020; Lin ve ark., 2025)

Çevrim	Bileşen	Durum		Kaçınılmaz Durum	
		Gerçek	İdeal	Ekserji Yıkımı	Yatırım Maliyeti
S-CO2 Döngüsü	K-1	$\eta = 84 \%$	$\eta = 100\%$	$\eta = 95\%$	$\eta = 70\%$
	K-2	$\eta = 84 \%$	$\eta = 100\%$	$\eta = 95\%$	$\eta = 70\%$
	T-1	$\eta = 84 \%$	$\eta = 100\%$	$\eta = 95\%$	$\eta = 70\%$
	ID-4	$\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 7 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 20$
LNG Hattı	P-1	$\eta = 85\%$	$\eta = 100\%$	$\eta = 95\%$	$\eta = 90\%$
	ID-2	$\Delta P_{ID} = 5 \%$	$\Delta P_{ID} = 0 \%$	$\Delta P_{ID} = 1 \%$	85%
	ID-3	$\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 9 \text{ }^\circ\text{C}$
	T-2	$\eta = 80\%$	$\eta = 100\%$	$\eta = 95\%$	$\eta = 90\%$
Jeotermal Hattı	ID-1	$\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 3 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
	T-3	$\eta = 85\%$	$\eta = 100\%$	$\eta = 95\%$	$\eta = 70\%$
	P-2	$\eta = 85\%$	$\eta = 100\%$	$\eta = 95\%$	$\eta = 80\%$
	GV	İzentropik	İzentropik	İzentropik	0.9
\dot{W}_{net}		6897 kW			

3.4. Eksergo-ekonomik Analiz

3.4.1. Geleneksel eksergo-ekonomik analiz

Mühendislik ve enerji sistemleri dallarında sıklıkla uygulanan eksergo-ekonomik analiz termodinamik ve ekonomik verimin bir arada incelenmesine olanak sağlar. Ekserji analizi enerjinin kalitesi ve kayıplarını incelerken bileşenlerin ve kaynakların maliyetini değerlendiren ekonomik analiz ile bir araya gelerek ekserjinin maliyetini ve tahribatını geniş bir alanda değerlendirmeye olanak sağlar. Bu analiz sonucunda sistemdeki ekonomik uygulanabilirlik ve verimsizliklerden net ve güçlü bir şekilde bahsedilebilir. Eksergo-ekonomik modellerin kullanımı ihtiyacı olan bileşenlerin iyileştirilmesinin belirlenmesine sistem modellemesinin en iyi şekilde değiştirilerek verimli bir şekilde dağıtılmasına imkan sağlamaktadır (Jovijari ve ark., 2023).

Bu sistemin geleneksel eksergo-ekonomik analizinde özgül ekserji maliyeti (SPECO) metodu kullanılmıştır. SPECO metodu ekserjinin maliyetlendirmesi sonucunda bir bileşenle etkileşime giren her ürün ve yakıt akışının ekserjisine maliyet yüklemeyi ve sonrasında bileşenler için ekserji alt yapılı eşit etkide maliyet oluşturmayı hedefler. (Baldvinsson ve ark., 2014) Ayrıntılı maliyet denklemi aşağıdaki gibidir (Guove ark., 2021; Jovijari ve ark., 2023):

$$\sum_k \dot{C}_{f,k} + \dot{Z}_k = \sum_k \dot{C}_{p,k} \quad (3.65)$$

$$\dot{C}_{q,k} + \sum \dot{C}_{giren,k} + \dot{Z}_k = \dot{C}_{w,k} + \sum \dot{C}_{çıkan,k} \quad (3.66)$$

Denkleme;

\dot{C}_q : Isı transferi maliyet oranı

\dot{C}_w : Güç maliyet oranı

\dot{C}_g : Giriş maliyet oranı

\dot{C}_c : Çıkış maliyet oranı

\dot{Z} : Yatırım maliyet oranı

ifade etmektedir. Aşağıdaki denklemde kullanılan ekserjinin maliyet hızı belirlenmektedir.

$$\dot{C}_i = c_i \dot{E}_{x_i} \quad (3.67)$$

Yukarıdaki denklemde akış i 'nin maliyet oranı, ekserji oranının fonksiyonu ve birim ekserji başına maliyetidir (Baldvinsson ve ark., 2014).

Ekserji maliyetlendirme yönteminde sistemin her bileşeni için değişik maliyet dengelerini içerir. Maliyet dengesi, giren ekserji akışlarının toplam maliyeti oranına ek olarak sermaye harcamaları, bakım ve işletme giderleri için hesaplanan toplam ücret, ekserji akışlarının toplam maliyet oranlarına eşit olduğunu gösterir.

Her bir bileşen için yatırım maliyet denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir. (Ghaebi ve ark., 2018)

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k \cdot CRF \cdot \varphi}{3600 \cdot N} \quad (3.68)$$

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3.69)$$

Yukarıdaki denklemlerde CRF sermaye kurtarma faktörü, i faiz oranı, n toplam işletme süresini ve φ bakım faktörünü ifade etmekte ve bu değerler Çizelge 3.3'de verilmektedir (Guo ve ark., 2021).

Çizelge 3.3. SPECO analizinde kullanılan ekonomik parametreler

Bileşen	Değer
Çalışma saati N	7446x3600
Bakım faktörü φ	1.06
Toplam işletme süresi n	20
Faiz oranı i	0.10

Aşağıda her bir sistem bileşenine ait SPECO maliyet denklemleri verilmiştir:

Kompresör K-1 için;

$$\text{Denge denklemi: } \dot{C}_{17} + \dot{W}_{K-1} c_{w,K-1} + \dot{Z}_{K-1} = \dot{C}_{18} \quad (3.70)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } c_{w,CMC} = c_{w,CT} \quad (3.71)$$

Kompresör K-2 için;

$$\text{Denge denklemi: } \dot{C}_{20} + \dot{W}_{CRC} c_{w,CRC} + \dot{Z}_{CRC} = \dot{C}_{21} \quad (3.72)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } c_{w;K-2} = c_{w;T-1} \quad (3.73)$$

Türbin T-1 için;

$$\text{Denge denklemi: } \dot{C}_{23} + \dot{Z}_{T-1} = \dot{C}_{24} + \dot{W}_{T-1}c_{w,T-1} \quad (3.74)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } c_{23} = c_{24} \text{ (F Kuralı)} \quad (3.75)$$

Türbin T-2 için;

$$\text{Denge denklemi: } \dot{C}_{13} + \dot{Z}_{T-2} = \dot{C}_{14} + \dot{W}_{T-2}c_{w,T-2} \quad (3.76)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } c_{13} = c_{14} \text{ (F Kuralı)} \quad (3.77)$$

Türbin T-3 için;

$$\text{Denge denklemi: } \dot{C}_4 + \dot{Z}_{T-3} = \dot{C}_5 + \dot{W}_{T-3}c_{w,T-3} \quad (3.78)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } c_4 = c_5 \text{ (F Kuralı)} \quad (3.79)$$

Pompa P-1 için;

$$\text{Denge denklemi: } \dot{C}_{10} + \dot{W}_{P-1}c_{w,P-1} + \dot{Z}_{P-1} = \dot{Z}_{11} \quad (3.80)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } c_{w,P-1} = c_{w,T-2} \quad (3.81)$$

$$c_{10} = 6.98 \cdot 10^{-6} \text{ \$/kJ (Kabul) (Dutta ve ark., 2018)}$$

Pompa P-2 için;

$$\text{Denge denklemi: } \dot{C}_6 + \dot{W}_{P-2}c_{w,P-2} + \dot{Z}_{P-2} = \dot{C}_7 \quad (3.82)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } c_{w,P-2} = c_{w,T-3} \quad (3.83)$$

Flaş Tankı FT için;

$$\text{Denge denklemi: } \dot{C}_3 + \dot{Z}_{FT} = \dot{C}_4 + \dot{C}_8 \quad (3.84)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } c_4 = c_8 \text{ (P Kuralı)} \quad (3.85)$$

Isı Değiştirici ID-1 için;

$$\text{Denge denklemi: } \dot{C}_1 + \dot{C}_{22} + \dot{Z}_{ID-1} = \dot{C}_2 + \dot{C}_{23} \quad (3.86)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } c_1 = c_2 \text{ (F Kuralı)} \quad (3.87)$$

$$c_1 = 1.3 \times 10^{-6} \text{ \$/kJ (Kabul) (Hai ve ark., 2023)}$$

Isı Değiştirici ID-2 için;

$$\text{Denge denklemi: } \dot{C}_{11} + \dot{C}_{16} + \dot{Z}_{ID-2} = \dot{C}_{12} + \dot{C}_{17} \quad (3.88)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } c_{16} = c_{17} \text{ (F Kuralı)} \quad (3.89)$$

Isı Değiştirici ID-3 için;

$$\text{Denge denklemi: } \dot{C}_5 + \dot{C}_{12} + \dot{Z}_{ID-3} = \dot{C}_6 + \dot{C}_{13} \quad (3.90)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } c_5 = c_6 \text{ (F Kuralı)} \quad (3.91)$$

Isı Değiştirici ID-4 için;

$$\text{Denge denklemi: } \dot{C}_{18} + \dot{C}_{24} + \dot{Z}_{ID-4} = \dot{C}_{15} + \dot{C}_{19} \quad (3.92)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } c_{15} = c_{24} \text{ (F Kuralı)} \quad (3.93)$$

Mikser için;

$$\text{Denge denklemi: } \dot{C}_{19} + \dot{C}_{21} + \dot{Z}_M = \dot{C}_{22} \quad (3.94)$$

$$\dot{C}_7 + \dot{C}_8 + \dot{Z}_M = \dot{C}_9 \quad (3.95)$$

Seperatör için;

$$\text{Denge denklemi: } \dot{C}_{15} + \dot{Z}_M = \dot{C}_{16} + \dot{C}_{20} \quad (3.96)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } c_{16} = c_{20} \text{ (P Kuralı)} \quad (3.97)$$

Eveparatör için;

$$\text{Denge denklemi: } \dot{C}_2 + \dot{Z}_{GV} = \dot{C}_3 \quad (3.98)$$

Çizelge 3.4, sistem bileşenlerinin Z_k değerlerini belirlemek için kullanılan denklemler verilmektedir.

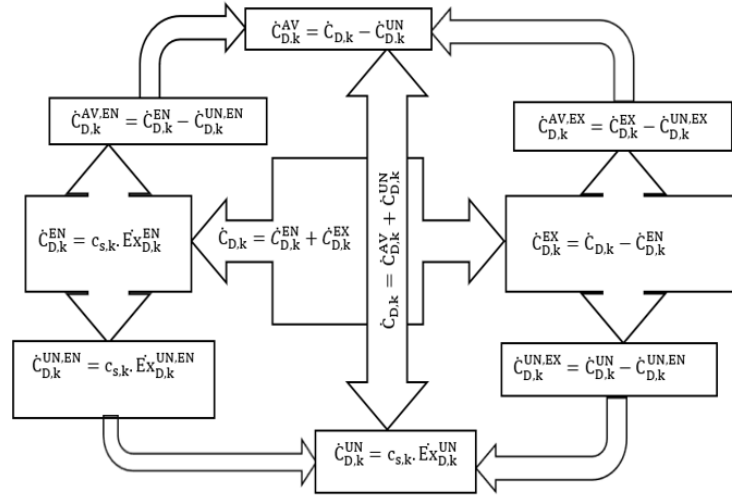
Çizelge 3.4. Sistemin bileşenleri için Z_k değerleri

Bileşen	Sermaye Yatırım Fonksiyonu	Referans
T-1	$479.34 * \left(\frac{\dot{m}_{23}}{0.93 - \eta_{T-1}}\right) * \ln\left(\frac{P_{23}}{P_{24}}\right) * (1 + \ln(0.036 * (T_{23} + 273.15) - 54.4))$	(Hassani Mokarram ve ark., 2020)
T-2	$479.34 * \left(\frac{\dot{m}_{13}}{0.93 - \eta_{T-2}}\right) * \ln\left(\frac{P_{13}}{P_{14}}\right) * (1 + \ln(0.036 * (T_{13} + 273.15) - 54.4))$	(Lee ve ark., 2015)
T-3	$479.34 * \left(\frac{\dot{m}_4}{0.93 - \eta_{T-3}}\right) * \ln\left(\frac{P_4}{P_5}\right) * (1 + \ln(0.036 * (T_4 + 273.15) - 54.4))$	(Kanbur ve ark., 2017)
GV	$114.5 * \dot{m}_2$	(Habibollahzade ve ark., 2022)
ID-1	$2681 * A_{ID-1}^{0.59}$	(Kanbur ve ark., 2017)
ID-2	$2143 * A_{ID-2}^{0.514}$	(Hassani Mokarram ve ark., 2020)
ID-3	$2143 * A_{ID-3}^{0.514}$	(Lee ve ark., 2015)
ID-4	$2143 * A_{ID-4}^{0.514}$	(Hassani Mokarram ve ark., 2020)
K-1	$71.1 * \left(\frac{\dot{m}_{17}}{0.92 - \eta_{K-1}}\right) * Pr_{SCO2} * \ln(Pr_{SCO2})$	(Hassani Mokarram ve ark., 2020)
K-2	$71.1 * \left(\frac{\dot{m}_{20}}{0.92 - \eta_{K-2}}\right) * Pr_{SCO2} * \ln(Pr_{SCO2})$	(Hassani Mokarram ve ark., 2020)
P-1	$1120 * \dot{W}_{P-1}^{0.8}$	(Hassani Mokarram ve ark., 2020)
P-2	$1120 * \dot{W}_{P-2}^{0.8}$	(Hassani Mokarram ve ark., 2020)

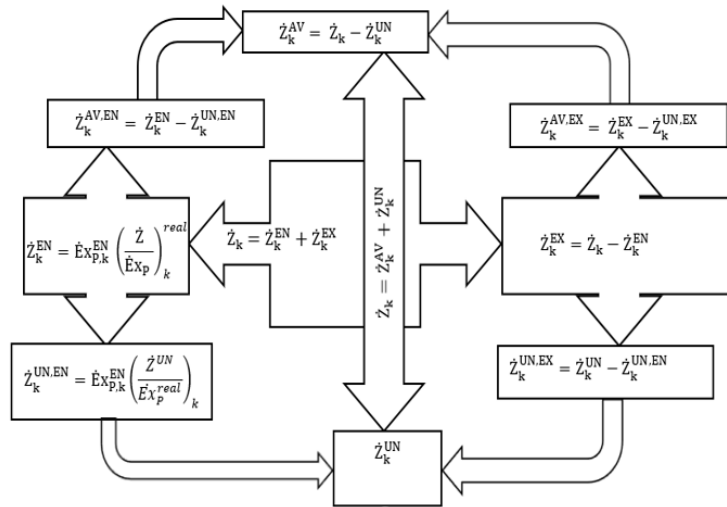
3.4.2. İleri eksergo-ekonomik analiz

İleri eksergo-ekonomik analiz, ileri ekserji analizi ile ekonomik nitelikleri bir araya getiren kompleks bir araçtır. Bu analiz sayesinde yatırım maliyetleri ve ekserji yıkımının maliyet oranları hakkında bilgi sağlarız. Fakat bu analiz sonucunda ekserji yıkımının maliyet oranları bileşenlerin etkileşimlerinden dolayı bilinemez. Bu bilgiye ileri ekserji analizi sayesinde ulaşırız hatta bu oranların hakkında detaylı bilgi sahibi oluruz.

İEKOA'da, ekserji yıkımı ve yatırım maliyetleri bölümlere ayrılır. Sistem bileşenlerinin ekserji yıkımı ve yatırım maliyetlerinin parçalarını hesaplamayı sağlayan denklemler Şekil 3.4 ve Şekil 3.5' te verilmiştir.



Şekil 3.4. \dot{C} değerlerinin bölümlerini hesaplamak için kullanılan denklemler (Liu ve ark., 2024)



Şekil 3.5. \dot{Z} değerlerinin bölümlerini hesaplamak için kullanılan denklemler (Liu ve ark., 2024)

3.5. Eksergo-Çevresel Analiz

3.5.1 Geleneksel eksergo-çevresel analiz

Çevresel etki denklemleri, sistem bileşenlerinin yakıt ve ürünlerinin ekserjisinden kaynaklanan çevresel etkiler ile sistem bileşenlerinin yatırımlarıyla ilişkili çevresel etkiler dikkate alınarak GEKO denklemleriyle benzer şekilde formüle edilmiştir. Her bir sistem bileşeni için çevresel etki denklemleri benzer şekilde formüle edilir.

$$\sum_k \dot{B}_{f,k} + \dot{Y}_k = \sum_k \dot{B}_{p,k} \quad (3.99)$$

$$\sum \dot{B}_{\text{çıkış},k} + \dot{B}_{w,k} = \sum \dot{B}_{\text{giriş},k} + \dot{B}_{q,k} + \dot{Y}_k \quad (3.100)$$

Her sistem bileşeni için çevresel etki denklemleri aşağıda sunulmuştur.

Kompresör K-1 için;

$$\text{Maliyet dengeleri: } \dot{B}_{17} + \dot{W}_{K-1} b_{w,K-1} + \dot{Y}_{K-1} = \dot{B}_{18} \quad (3.101)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } b_{w,K-1} = b_{w,T-1} \quad (3.102)$$

Kompresör K-2 için;

$$\text{Maliyet dengeleri: } \dot{B}_{20} + \dot{W}_{K-2} b_{w,K-2} + \dot{Y}_{K-2} = \dot{B}_{21} \quad (3.103)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } b_{w,K-2} = b_{w,T-1} \quad (3.104)$$

Türbin T-1 için;

$$\text{Maliyet dengeleri: } \dot{B}_{23} + \dot{Y}_{T-1} = \dot{B}_{24} + \dot{W}_{T-1} b_{w,T-1} \quad (3.105)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } b_{23} = b_{24} \text{ (F Kuralı)} \quad (3.106)$$

$$b_{w,T-1} = 6206 \text{ mPts/G (Kabul) (Fang ve ark., 2023; Li ve ark., 2025)}$$

Türbin T-2 için;

$$\text{Maliyet dengeleri: } \dot{B}_{13} + \dot{Y}_{T-2} = \dot{B}_{14} + \dot{W}_{T-2} b_{w,T-2} \quad (3.107)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } b_{13} = b_{14} \text{ (F Kuralı)} \quad (3.108)$$

$$b_{w,T-2} = 6206 \text{ mPts/G (Kabul) (Fang ve ark., 2023; Li ve ark., 2025)}$$

Türbin T-3 için;

$$\text{Maliyet dengeleri: } \dot{B}_4 + \dot{Y}_{T-3} = \dot{B}_5 + \dot{W}_{T-3} b_{w,T-3} \quad (3.109)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } b_4 = b_5 \text{ (F Kuralı)} \quad (3.110)$$

Pompa P-1 için;

$$\text{Maliyet dengeleri: } \dot{B}_{10} + \dot{W}_{P-1} b_{w,P-1} + \dot{Y}_{P-1} = \dot{B}_{11} \quad (3.111)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } b_{w,P-1} = b_{w,T-2} \quad (3.112)$$

Pompa P-2 için;

$$\text{Maliyet dengeleri: } \dot{B}_6 + \dot{W}_{P-2} b_{w,P-2} + \dot{Y}_{P-1} = \dot{B}_7 \quad (3.113)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } b_{w,P-2} = b_{w,T-3} \quad (3.114)$$

Flaş Tankı FT için;

$$\text{Maliyet dengeleri: } \dot{B}_3 + \dot{Y}_{FT} = \dot{B}_4 + \dot{B}_8 \quad (3.115)$$

$$\text{Yardımcı denklemi: } b_4 = b_8 \text{ (P Kuralı)} \quad (3.116)$$

Isı Değiştirici ID-1 için;

$$\text{Maliyet dengeleri: } \dot{B}_1 + \dot{B}_{22} + \dot{Y}_{ID-1} = \dot{B}_2 + \dot{B}_{23} \quad (3.117)$$

Yardımcı denklemi: $b_1 = b_2$ (F Kuralı) (3.118)

Isı Değiştirici ID-2 için;

Maliyet dengeleri: $\dot{B}_{11} + \dot{B}_{16} + \dot{Y}_{ID-2} = \dot{B}_{12} + \dot{B}_{17}$ (3.119)

Yardımcı denklemi: $b_{16} = b_{17}$ (F Kuralı) (3.120)

Isı Değiştirici ID-3 için;

Maliyet dengeleri: $\dot{B}_5 + \dot{B}_{12} + \dot{Y}_{ID-3} = \dot{B}_6 + \dot{B}_{13}$ (3.121)

Yardımcı denklemi: $b_5 = b_6$ (F Kuralı) (3.122)

Isı Değiştirici ID-4 için;

Maliyet dengeleri: $\dot{B}_{18} + \dot{B}_{24} + \dot{Y}_{ID-4} = \dot{B}_{15} + \dot{B}_{19}$ (3.123)

Yardımcı denklemi: $b_{15} = b_{24}$ (F Kuralı) (3.124)

Mikser için;

Maliyet dengeleri: $\dot{B}_{19} + \dot{B}_{21} + \dot{Y}_M = \dot{B}_{22}$ (3.125)

$$\dot{B}_7 + \dot{B}_8 + \dot{Y}_M = \dot{B}_9 \quad (3.126)$$

Seperatör için;

Maliyet dengeleri: $\dot{B}_{15} + \dot{Y}_S = \dot{B}_{16} + \dot{B}_{20}$ (3.127)

Yardımcı denklemi: $b_{16} = b_{20}$ (P Kuralı) (3.128)

Genleşme Vanası için;

Maliyet dengeleri: $\dot{B}_2 + \dot{Y}_{GV} = \dot{B}_3$ (3.129)

\dot{Y}_k sistem bileşeniyle ilişkili çevresel etkiyi temsil eder ve aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır. (Mohammadi ve ark., 2023)

$$\dot{Y}_k = \dot{Y}_k^{CO} + \dot{Y}_k^{OM} + \dot{Y}_k^{DI} \quad (3.130)$$

Burada, \dot{Y}_k^{CO} inşaatla ilgili çevresel etkiyi temsil eder ve bu, üretim, taşımacılık ve montajı kapsar. \dot{Y}_k^{OM} işletme ve bakım faaliyetlerinden kaynaklanan çevresel etkiyi belirtir. Son olarak, \dot{Y}_k^{DI} operasyonel faz sırasında oluşan kirletici emisyonlar dahil olmak üzere bertarafla ilgili çevresel etkiye karşılık gelir. (Mohammadi ve ark., 2023)

Çizelge 3.5, genel sistem bileşenlerinin ağırlık denklemlerini sağlar.

Çizelge 3.5. Sistem bileşenlerinin ağırlık denklemleri (Cavalcanti 2017b; Ren ve ark., 2023; Tsatsaronis ve ark., 2010a; Wang ve ark., 2022)

Bileşen	Ağırlık denklemleri (ton)
T-3	Ağırlık= $4.9\dot{W}_{T-3}^{0.73}$; \dot{W} , MW cinsindedir.
T-2	Ağırlık= $4.9\dot{W}_{T-2}^{0.73}$; \dot{W} , MW cinsindedir.
ID-1	Ağırlık= $2.14 \times \dot{Q}_{ID-1}^{0.7}$; \dot{Q} , MW cinsindedir.
ID-4	Ağırlık= $2.14 \times \dot{Q}_{ID-4}^{0.7}$; \dot{Q} , MW cinsindedir.
P-2	Ağırlık= $0.0061 \times \dot{W}_{P-2}^{0.95}$; \dot{W} , kW cinsindedir.
ID-2	Ağırlık= $2.14 \times \dot{Q}_{ID-2}^{0.7}$; \dot{Q} , MW cinsindedir.
ID-3	Ağırlık= $2.14 \times \dot{Q}_{ID-3}^{0.7}$; \dot{Q} , MW cinsindedir.
P-1	Ağırlık= $0.0061 \times \dot{W}_{P-1}^{0.95}$; \dot{W} , kW cinsindedir.
K-1	Ağırlık= $\frac{P_{çıkış} \times d_{AC} \times FS_{AC}}{2 \times \sigma_{AC}}$ $FS_{AC} = 2$, $\sigma_{AC} = 15.8$ Mpa d_{AC} : çap ($v_{AC}=15$ m/s kullanılarak)
K-2	Ağırlık= $\frac{P_{çıkış} \times d_{AC} \times FS_{AC}}{2 \times \sigma_{AC}}$ $FS_{AC} = 2$, $\sigma_{AC} = 15.8$ Mpa d_{AC} : çap ($v_{AC}=15$ m/s kullanılarak)
T-1	Ağırlık= $\frac{P_{çıkış} \times d_{T-3} \times FS_{T-3}}{2 \times \sigma_{T-3}}$ $FS_{T-3} = 2$, $\sigma_{T-3} = 5.9$ Mpa d_{T-3} : çap ($v_{T-3}=13$ m/s kullanılarak)

3.5.2 İleri eksergo-çevresel analizi

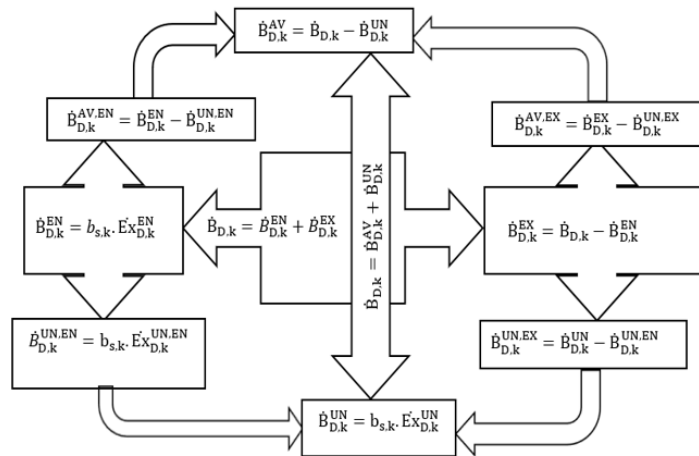
Ekserji analizi ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA), eksergo-çevresel analiz sağlamak için kullanılabilir. Bir ürünün çevresel etkisini yaşam döngüsü süreci boyunca değerlendirmek için kullanılan bir yöntem, yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) olarak bilinir. Bu çalışmada, LCA'yı değerlendirmek için ECO-indicator '99 kullanılmaktadır. Her süreç bileşeninde kullanılan malzemelerin etkisini nitelendirmemize yardımcı olacak veriler, ECO-indicator '99 tarafından sağlanmaktadır (Khoshgoftar Manesh ve ark., 2013). Sistem bileşenlerinin tahmini malzeme ve ECO-indicator '99 değerleri Çizelge 3.6.'de gösterilmektedir. Çevresel etkileri değerlendirmenin, her zaman bilinmeyenleri içeren subjektif bir süreç olduğunu unutmamak önemlidir (Tsatsaronis ve ark., 2009).

Çizelge 3.6. Önerilen güç sisteminin bileşenlerine ait tahmini malzeme bileşimi ve Eco-indicator 99 değerlerine göre, gerçek ve kaçınılmaz durumların çevresel etkileri değerlendirilmiştir (Cavalcanti 2017a; Tsatsaronis ve ark., 2010b; Wang ve ark., 2020)

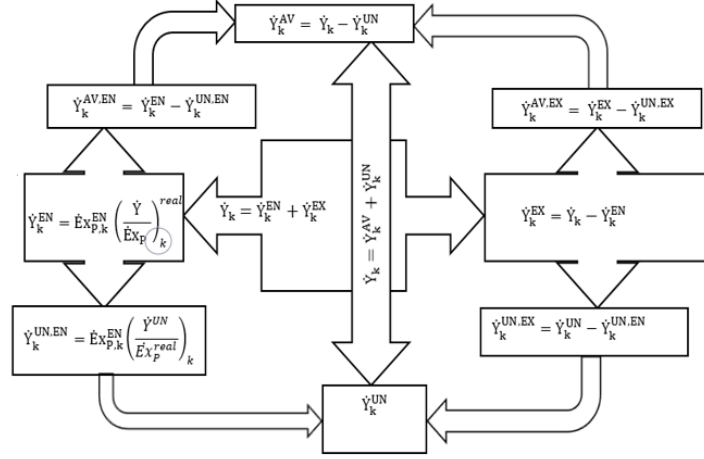
Bileşen	Malzeme Bileşimi	Eco'99 mPts/kg		Malzeme mPts/kg	İşlem mPts/kg	Atık mPts/kg	Toplam mPts/kg
T-3	Çelik	25	86	704	11.7	-70	645.7
	Yüksek Alaşımli Çelik	75	910				
	Orta Alaşımli Çelik	-	600				
	Düşük Alaşımli Çelik	-	110				
T-3^{UN}	Çelik	25	86	471	11.7	-70	412.7
	Yüksek Alaşımli Çelik	-	910				
	Orta Alaşımli Çelik	75	600				
	Düşük Alaşımli Çelik	-	110				
T-2	Çelik	25	86	704	11.7	-70	645.7
	Yüksek Alaşımli Çelik	75	910				
	Orta Alaşımli Çelik	-	600				
	Düşük Alaşımli Çelik	-	110				
T-2^{UN}	Çelik	25	86	471	11.7	-70	412.7
	Yüksek Alaşımli Çelik	-	910				
	Orta Alaşımli Çelik	75	600				
	Düşük Alaşımli Çelik	-	110				
ID-1	Çelik	20	86	209	12.1	-70	151.1
	Düşük Alaşımli Çelik	-	110				
	Dökme Demir	80	240				
ID-1^{UN}	Çelik	20	86	105	12.1	-70	47.1
	Düşük Alaşımli Çelik	80	110				
	Dökme Demir	-	240				
ID-4	Çelik	20	86	209	12.1	-70	151.1
	Düşük Alaşımli Çelik	-	110				
	Dökme Demir	80	240				
ID-4^{UN}	Çelik	20	86	105	12.1	-70	47.1
	Düşük Alaşımli Çelik	80	110				
	Dökme Demir	-	240				
P-2	Çelik	35	86	186	16.9	-70	132.9
	Düşük Alaşımli Çelik	-	110				
	Dökme Demir	65	240				
P-2^{UN}	Çelik	35	86	102	16.9	-70	48.9
	Düşük Alaşımli Çelik	65	110				
	Dökme Demir	-	240				
ID-2	Çelik	20	86	209	12.1	-70	151.1
	Düşük Alaşımli Çelik	-	110				
	Dökme Demir	80	240				
ID-2^{UN}	Çelik	20	86	105	12.1	-70	47.1
	Düşük Alaşımli Çelik	80	110				
	Dökme Demir	-	240				
ID-3	Çelik	20	86	209	12.1	-70	151.1
	Düşük Alaşımli Çelik	-	110				
	Dökme Demir	80	240				
ID-3^{UN}	Çelik	20	86	105	12.1	-70	47.1
	Düşük Alaşımli Çelik	80	110				
	Dökme Demir	-	240				
P-1	Çelik	35	86	186	16.9	-70	132.9
	Düşük Alaşımli Çelik	-	110				

	Dökme Demir	65	240				
P-1 ^{UN}	Çelik	35	86	102	16.9	-70	48.9
	Düşük Alaşımli Çelik	65	110				
	Dökme Demir	-	240				
K-1	Çelik	33	86	131	11.7	-70	72.7
	Düşük Alaşımli Çelik	45	110				
	Dökme Demir	22	240				
K-1 ^{UN}	Çelik	33	86	102	11.7	-70	43.7
	Düşük Alaşımli Çelik	67	110				
	Dökme Demir	-	240				
K-2	Çelik	33	86	131	11.7	-70	72.7
	Düşük Alaşımli Çelik	45	110				
	Dökme Demir	22	240				
K-2 ^{UN}	Çelik	33	86	102	11.7	-70	43.7
	Düşük Alaşımli Çelik	67	110				
	Dökme Demir	-	240				
T-1	Çelik	25	86	704	11.7	-70	645.7
	Yüksek Alaşımli Çelik	75	910				
	Orta Alaşımli Çelik	-	600				
	Düşük Alaşımli Çelik	-	110				
	Dökme Demir	-	240				
T-1 ^{UN}	Çelik	25	86	471	11.7	-70	412.7
	Yüksek Alaşımli Çelik	-	910				
	Orta Alaşımli Çelik	75	600				
	Düşük Alaşımli Çelik	-	110				
	Dökme Demir	-	240				

İleri eksergo-çevresel analizinde, ekserji yıkımından ($\dot{B}_{D,k}$) ve sistem bileşenlerinden (\dot{Y}_k) kaynaklanan çevresel etkiler, içsel ($\dot{B}_{D,k}^{EN}$), dışsal ($\dot{B}_{D,k}^{EX}$), kaçınılabılır ($\dot{B}_{D,k}^{AV}$), ve kaçınılamaz ($\dot{B}_{D,k}^{UN}$) kısımlara ayrılmıştır. Kaçınılabılır çevresel etkiler, içsel ($\dot{B}_{D,k}^{AV,EN}$) ve dışsal ($\dot{B}_{D,k}^{AV,EX}$) bölümlerine ayrılırken, kaçınılamaz çevresel etkiler de içsel ($\dot{B}_{D,k}^{UN,EN}$) ve dışsal ($\dot{B}_{D,k}^{UN,EX}$) bölümlerine ayrılmıştır. $\dot{B}_{D,k}$ ve \dot{Y}_k değerlerinin hesaplanmasında kullanılan denklemler Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de sunulmaktadır.



Şekil 3.6. $\dot{E}x_{D,k}$ ile ilgili çevresel etki bölüşüm denklemleri (Mehrenjani ve ark., 2024)



Şekil 3.7. Sistem bileşeniyle ilgili çevresel etki bölüşüm denklemleri (Mehrenjani ve ark., 2024)

3.6. Genel Sistemin Performans Kriterleri

Önerilen sistemin amacı, hem LNG gazlaştırma sürecini gerçekleştirmek hem de elektrik gücü üretmektir. Bu nedenle, enerji verimliliği (η_{enerji}), ekserji verimliliği ($\eta_{ekserji}$), modifiye ekserji verimliliği ($\eta_{ekserji}^{adv}$), ortalama birim ürün maliyeti ($c_{p,amaç,toplam}$), modifiye ortalama birim ürün maliyeti ($c_{p,amaç,toplam}^{adv}$), ortalama birim ürün çevresel etkisi ($b_{p,amaç,toplam}$) ve modifiye ortalama birim ürün çevresel etkisi ($b_{p,amaç,toplam}^{adv}$), sistemin genel performans kriterleri olarak belirlenmiştir.

Sistemin η_{enerji} , $\eta_{ekserji}$ ve $\eta_{ekserji}^{adv}$ değerleri sırasıyla aşağıdaki denklemlerle bulunur.

$$\eta_{enerji} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_1(h_1 - h_9)} \quad (3.131)$$

$$\eta_{ekserji} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{14}}{(\dot{E}x_1 - \dot{E}x_9) + \dot{E}x_{10}} \quad (3.132)$$

$$\eta_{ekserji}^{adv} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{14}}{(\dot{E}x_1 - \dot{E}x_9) + \dot{E}x_{10} - \sum \dot{E}x_{D,k}^{UN}} \quad (3.133)$$

Sistemin $c_{p,amaç,toplam}$ ve $c_{p,amaç,toplam}^{adv}$ değerleri sırasıyla aşağıdaki denklemlerle bulunur.

$$c_{p,amaç,toplam} = \frac{\sum_{i=1}^{nk} \dot{Z}_k + \sum_{i=1}^{nk} \dot{C}_{f,k}}{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{14}} \quad (3.134)$$

$$c_{p,amaç,toplam}^{adv} = \frac{(\sum_{i=1}^{nk} \dot{Z}_k)_{AV} + \sum_{i=1}^{nk} \dot{C}_{f,k} - (\sum_{i=1}^{nk} \dot{C}_{D,k})_{UN}}{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{14}} \quad (3.135)$$

Sistemin $b_{p,amaç,toplam}$ ve $b_{p,amaç,toplam}^{adv}$ değerleri sırasıyla aşağıdaki denklemlerle bulunur.

$$b_{p,amaç,toplam} = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} \dot{Y}_k + \sum_{i=1}^{n_k} \dot{B}_{f,k}}{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{14}} \quad (3.136)$$

$$b_{p,amaç,toplam}^{adv} = \frac{(\sum_{i=1}^{n_k} \dot{Y}_k)_{AV} + \sum_{i=1}^{n_k} \dot{B}_{f,k} - (\sum_{i=1}^{n_k} \dot{B}_{D,k})_{UN}}{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{14}} \quad (3.137)$$

3.7. Genel Sistemin Duyarlılık Analizi

Bir duyarlılık analizi, karar değişkenlerinin genel sistem performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Duyarlılık analizi için, sistem performansını etkileyen karar değişkenleri, ileri ekserji, ileri ekserji-ekonomik ve ileri ekserji-çevresel analizler kavramlarına dayalı olarak ID-3 sıcaklık farkı ile T-1, T-2, T-3 ve P-1'in izentropik verimlilikleri olarak belirlenmiştir. Performans kriterleri enerji (η_{enerji}) ve ekserji verimlilikleri ($\eta_{ekserji}$), ile birlikte, ortalama birim ürün maliyeti ($c_{p,amaç,toplam}$) ve ortalama birim çevresel etki ($amaç, toplam$) olarak tanımlanmıştır. Karar değişkenlerinin değişim aralıkları Çizelge 3.7'de sunulmaktadır.

Çizelge 3.7. Karar değişkenlerinin değişim aralığı

Karar Değişkeni	Değişim Aralığı
ID-3 için ΔT , °C	5-10
η_{T-1} , %	84-90
η_{T-3} , %	85-90
η_{T-2} , %	80-90
η_{P-1} , %	85-95

3.8. Önerilen Güç Sistemin Çok Amaçlı Optimizasyonu Çalışması

Dominant Olmayan Sıralama Genetik Algoritması II (NSGA-II), çeşitli Pareto-optimal çözümler üretebilme yeteneği nedeniyle çoklu amaç optimizasyon problemlerini çözmek için önemli bir yöntem haline gelmiştir. NSGA-II, birinci nesil NSGA'ya göre birkaç önemli iyileştirme içerir. Bunlar arasında daha verimli sıralama mekanizmaları, elitizm stratejisi ve ek kontrol parametreleri eklemeyen popülasyon çeşitliliğini artıran kalabalık karşılaştırma operatörü bulunmaktadır. Bu metodolojik iyileştirmeler, yüksek boyutlu optimizasyon görevlerinde uygulama alanını önemli ölçüde artırmış ve mühendislik, lojistik ve finans gibi alanlarda tercih edilen bir yaklaşım haline getirmiştir (Verma ve ark., 2021).

Bu tez çalışmasında, çoklu amaç optimizasyonu için NSGA-II yöntemi kullanılmaktadır. NSGA-II çoklu hedef optimizasyon yöntemi için simülasyon koşulları Çizelge 3.8'de sunulmuştur.

Çizelge 3.8. NSGA-II yöntemi simülasyon koşulları

NSGA II giriş parametresi	Değer
Popülasyon Büyüklüğü	50
Çaprazlama Olasılığı	0.85
Mutasyon Olasılığı	0.08
Maksimum Nesil Sayısı	50

Anahtar parametreler, ID-3 sıcaklık farkı ve T-1, T-3, T-2 ve P-1'in izentropik verimlilikleri olarak belirlenmiştir. Amaç fonksiyonları arasında ekserji verimliliği ($\eta_{ekserji}$), ortalama birim ürün maliyeti ($c_{p,amaç,toplam}$), ve ortalama birim ürün çevresel etkisi ($b_{p,amaç,toplam}$) yer almaktadır. Anahtar parametrelerin değişim aralıkları Çizelge 3.9'da sunulmaktadır. Optimizasyon çalışması, sistemin ekserji verimliliğini maksimize ederken, ortalama birim ürün maliyetini ve ortalama birim ürün çevresel etkisini minimize etmeye yönelik anahtar parametreleri belirlemeyi amaçlamaktadır.

Çizelge 3.9. Anahtar parametrelerin değişim aralığı

Karar Değişkeni	Değişim Aralığı
ID-3 için ΔT , °C	5-10
η_{T-1} , %	85-90
η_{T-3} , %	85-90
η_{T-2} , %	80-90
η_{P-1} , %	85-95

3.9. Model Doğrulama

Çizelge 3.10, jeotermal akışla çalışan açık çevrimli güç çevrimi için mevcut modelin, literatürdeki benzer bir çalışma (Wang ve ark., 2015) ile karşılaştırılarak doğrulama sonuçlarını sunmaktadır. Benzer şekilde, Çizelge 3.11, referans çalışmadan (Ruiz-Casanova ve ark., 2024) elde edilen yeniden sıkıştırılmalı S-CO₂ çevrimine ait değerlerle bu çalışmada elde edilen doğrulama sonuçlarını karşılaştırmaktadır. Her iki çizelgedeki sonuçlar, referans çalışmalar ile mevcut analiz arasında güçlü bir uyum olduğunu göstermekte olup, önerilen modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini teyit etmektedir.

Çizelge 3.10. Jeotermal akışla çalışan açık güç çevrimi için mevcut model ile Ref.(Wang ve ark., 2015)'teki modelin karşılaştırılması

Durum Noktası Cao et al.	Durum Noktası Bu Çalışma	\dot{m} (kg/s)		Hata (%)	h (kJ/kg)		Hata (%)	s (kJ/kg.K)		Hata (%)
		(Wang ve ark., 2015)	Bu Çalışma		(Wang ve ark., 2015)	Bu Çalışma		(Wang ve ark., 2015)	Bu Çalışma	
1	2	Girdi Verisi	Girdi Verisi	-	719.4	719.4	0.00	2.041	2.042	0.04
2	3	10	10	0.00	719.4	719.4	0.00	2.046	2.046	0.00
3	4	0.375	0.375	0.00	2748.11	2748.12	0.00	6.821	6.821	0.00
4	8	9.625	9.625	0.00	640.09	640.09	0.00	1.860	1.860	0.00
5	5	0.375	0.375	0.00	2347.13	2347.14	0.00	7.121	7.122	0.01
6	6	0.375	0.375	0.00	251.42	251.42	0.00	0.832	0.832	0.00
Veri Girişi (Wang ve ark., 2015)	Jeotermal debi =10 kg/s Jeotermal sıcaklık =170°C Jeotermal basınç =900kPa Flash basıncı =500 kPa		Türbin izantropik verimi =%80 Türbin çıkış basıncı =20 kPa Çevresel ölü durum basıncı =101.33 kPa Çevresel ölü durum sıcaklığı =20°C							

Çizelge 3.11. Jeotermal akışla çalışan açık güç çevrimi için mevcut model ile Ref. (Ruiz-Casanova ve ark., 2024)'teki modelin karşılaştırılması

Durum Noktası Cao et al.	Durum Noktası Bu Çalışma	h (kJ/kg)		Hata (%)	s (kJ/kg.K)		Hata (%)
		(Ruiz-Casanova ve ark., 2024)	Bu Çalışma		(Ruiz-Casanova ve ark., 2024)	Bu Çalışma	
1	17	306.23	306.18	0.02	1.35	1.35	0.00
2	18	317.43	317.37	0.02	1.35	1.35	0.00
3	19	414.34	414.29	0.01	1.64	1.64	0.00
10	20	451.45	451.40	0.01	1.81	1.82	0.55
5	21	481.31	481.26	0.01	1.82	1.83	0.55
4	22	441.13	441.08	0.01	1.72	1.72	0.00
7	23	682.9	682.83	0.01	2.28	2.29	0.44
8	24	641.5	638.89	0.41	2.29	2.30	0.44
Veri Girişi (Ruiz-Casanova ve ark., 2024)	Jeotermal debi =40 kg/s Jeotermal sıcaklık =257.21°C Jeotermal basınç =4492.95 kPa CO ₂ debisi =40 kg/s Türbin izantropik verimi =%87 Ana kompresör giriş basıncı =7700 kPa		Ana kompresör giriş sıcaklığı =33°C Ana kompresör çıkış basıncı =140000 kPa Yeniden sıkıştırma kompresörü giriş basıncı =7720.31 Yeniden sıkıştırma kompresörü giriş sıcaklığı =54.51°C Kompresör izantropik verimi =%87				

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, hedeflenen birleşik güç sistemine ilişkin geleneksel ekserji, eksergo-ekonomik, eksergo-çevresel, ileri ekserji, ileri eksergo-ekonomik ve ileri eksergo-çevresel analiz sonuçları ayrıntılı olarak tartışılmaktadır. Sistemin matematik modeli oluşturulmuş ve çözümü Engineering Equation Solver (EES) programında yapılmıştır. Sistemin çözümlenmesi sonucunda termodinamik veriler 4.1’ de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Birleşik güç sisteminin termodinamik analiz verileri

Hat Numarası	\dot{m} (kg/s)	P (kPa)	T (°C)	ex (kJ/kg)	c (\$/GJ)	b (Pts/GJ)
1	165	1600	200	182.4	1.30	5.09
2	165	1600	186.3	159	1.30	5.09
3	165	300	133.5	148.2	1.40	5.46
4	17.51	300	133.5	711.9	1.40	5.46
5	17.51	100	99.61	531.4	1.40	5.46
6	17.51	100	99.61	189.1	1.40	5.46
7	17.51	300	133.5	244	1.86	5.04
8	147.5	300	133.5	81.32	1.40	5.46
9	165	300	133.5	98.58	1.52	5.35
10	40	7000	-161	1037	6.98	2.34
11	40	21000	-156	1061	7.35	2.40
12	40	19950	-88.77	838.4	9.47	3.54
13	40	19950	89.61	767.4	10.64	4.94
14	40	6650	14.01	606.1	10.64	4.94
15	70	7789	111	227.6	0.95	2.84
16	70	7400	35.17	206.1	0.65	1.96
17	28	7400	35.17	206.1	0.65	1.96
18	28	14800	85.56	229.5	0.79	2.14
19	28	14800	129.1	249.9	0.83	2.23
20	42	7400	35.17	206.1	0.65	1.96
21	42	14800	85.56	229.5	0.79	2.14
22	70	14800	100.4	236.8	0.81	2.19
23	70	14800	195	281	0.95	2.84
24	70	7789	139.1	237.1	0.95	2.84

Çizelge 4.2 ve Şekil 4.1, sırasıyla sistem bileşenlerinin ekserji yıkım bölümlerini sayısal ve yüzdesel olarak göstermektedir. Birlikte değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir:

- Geleneksel ekserji analizine göre, karar vericinin iyileştirme için odaklanması gereken sistem bileşenleri sırasıyla ID-2 (10401 kW), ID-3 (8836 kW) ve GV'dir (1770 kW). Ancak, ileri ekserji analizine göre bu sıralama T-2 (1002,30 kW,

$\dot{E}x_{D,k}$ 'nın 76%' sı), ID-2 (637 kW, $\dot{E}x_{D,k}$ 'nın %6' sı), ID-3 (335 kW, $\dot{E}x_{D,k}$ 'nın %3' ü), ve P-1 (304.7 kW, $\dot{E}x_{D,k}$ 'nın %54' ü).

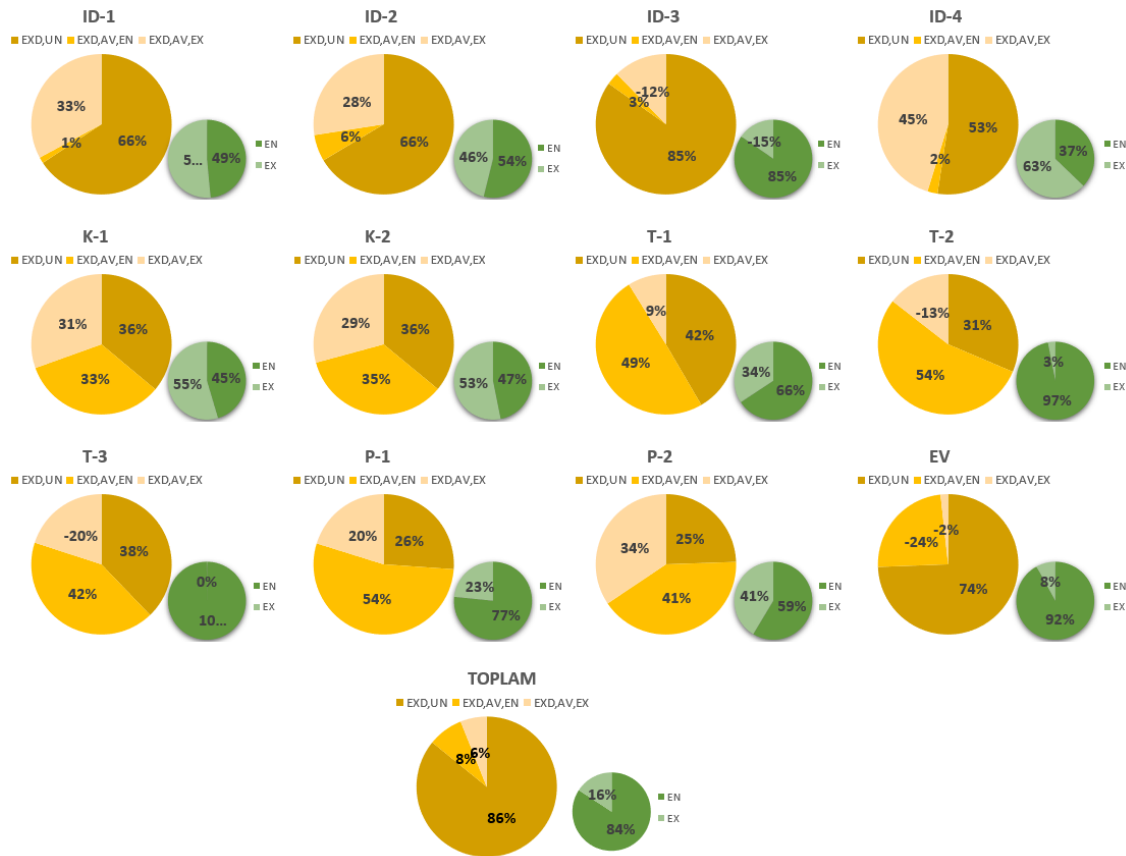
- Sistem, sistem ilişkileri açısından değerlendirildiğinde en yüksek $\dot{E}x_{D,k}^{AV,EX}$ değerlerine sahip bileşenler sırasıyla ID-2 (2856 kW, $\dot{E}x_{D,k}$ 'nın %28'i), ID-1 (250.4 kW, $\dot{E}x_{D,k}$ 'nın %33'ü), P-1 (114.5 kW, $\dot{E}x_{D,k}$ 'nın %20'si), ve K-2 (42.54 kW, $\dot{E}x_{D,k}$ %29'u). Diğer sistem bileşenlerinde herhangi bir iyileştirme, bu bileşenlerdeki geri döndürülemezlikleri azaltacaktır. Ancak, negatif $\dot{E}x_{D,k}^{AV,EX}$ değeri -1444 kW olan ID-3 için durum tam tersidir. Diğer sistem bileşenlerinde iyileştirme, bu bileşendeki geri döndürülemezliği artıracaktır.
- Genel sistem göz önüne alındığında, 3506.7 kW'lık $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$ değeriyle %14'lük bir iyileştirme potansiyeli göstermektedir. Bu iyileştirme oranı sistemin kendisi ve diğer sistem bileşenleriyle olan ilişkisi tarafından etkilenmektedir.

Çizelge 4.2. Önerilen güç sisteminin bileşenleri için ekserji oranı türleri

Bileşen	$\dot{E}x_{F,k}$ [kW]	$\dot{E}x_{P,k}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{EN}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{EX}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{UN}$ [kW]
ID-1	3859	3097	762.40	369.6	392.4	500.8
ID-2	58366	47966	10401	5603	4797	6907
ID-3	42847	34011	8836	10789	-1953	9944
ID-4	663.4	573.2	90.19	33.55	56.65	47.28
K-1	751.8	654.9	96.85	44.01	52.89	34.95
K-2	1128	982.4	145.3	68.25	77.35	52.42
T-1	3074	2711	363.7	238.50	124.50	151
T-2	6451	5136	1315	1275	40.00	581.3
T-3	3160	2781	379.4	379.40	-0.40	238.9
P-1	1528	959.8	567.9	435.20	133.00	148.20
P-2	1075	960.5	114.2	67.13	47.37	28
GV	26230	24459	1770	1629	142.00	2698.00
Toplam	149133.2	124291.8	24841.94	20931.64	3909.76	21331.85

Çizelge 4.2. Önerilen güç sisteminin bileşenleri için ekserji oranı türleri (Devamı)

Bileşen	$\dot{E}x_{D,k}^{AV}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{UN,EN}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{UN,EX}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{AV,EN}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{AV,EX}$ [kW]
ID-1	261.00	359.00	142.00	10.60	250.40
ID-2	3493.00	4966.00	1941.00	637.00	2856.00
ID-3	-1109.00	10454.00	-509.00	335.00	-1444.00
ID-4	42.90	31.45	15.85	2.10	40.80
K-1	61.90	11.63	23.37	32.38	29.52
K-2	93.20	17.59	34.81	50.66	42.54
T-1	212.00	58.54	92.46	179.96	32.04
T-2	734.00	272.70	308.30	1002.30	-268.30
T-3	140.00	113.10	125.90	266.30	-126.30
P-1	419.20	130.50	18.50	304.70	114.50
P-2	86.50	20.02	7.98	47.11	39.39
GV	-928.00	2494.00	205.00	-865.00	-63.00
Toplam	5117	18928.53	795.87	2003.11	3113.89



Şekil 4.1. Sistem bileşenlerinin kaçınılmaz, kaçınılabılır içsel ve dışsal ekserji yıkım oranları Çizelge 4.3 ve Şekil 4.2, sırasıyla sistem bileşenlerinin ekserji yıkım maliyeti bölümlerini sayısal ve yüzdesel olarak sunmaktadır. Birlikte değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir:

- Geleneksel eksergo-ekonomik analize göre odaklanılması gereken sistem bileşenleri T-2 (50.37 \$/h), P-1 (27.62 \$/h), ve GV (8.28 \$/h). İleri eksergo-ekonomik analiz'de sıralama şu şekildedir: T-2 (38.39 \$/h, $\dot{C}_{D,k}^{AV,EX}$ ' nın %76' sı), P-1 (14.82 \$/h, $\dot{C}_{D,k}^{AV,EX}$ ' nın %54' ü), ve T-3 (1.34 \$/h, $\dot{C}_{D,k}^{AV,EX}$ ' nın %70' i).
- Sistem ilişkileri açısından en yüksek $\dot{C}_{D,k}^{AV,EX}$ değerlerine sahip sistem bileşenleri şu şekildedir: P-1 (5.57 \$/h, $\dot{C}_{D,k}^{AV,EX}$ ' nın %20' si), ID-1 (1.17 \$/h, $\dot{C}_{D,k}^{AV,EX}$ ' nın %33'ü), ve ID-2 (1.00 \$/h, $\dot{C}_{D,k}^{AV,EX}$ ' nın %28' i). Bu sistem bileşenlerinde yapılacak iyileştirmeler diğer sistem bileşenlerinin performansını da artıracaktır. Ancak T-2 için, (-10.28 \$/h) negatif $\dot{C}_{D,k}^{AV,EX}$ değeri ile ters bir ilişki görülmektedir. Bu sistem bileşeninde yapılacak iyileştirmeler diğer sistem bileşenlerinin ekserji yıkım maliyetlerini artıracaktır.

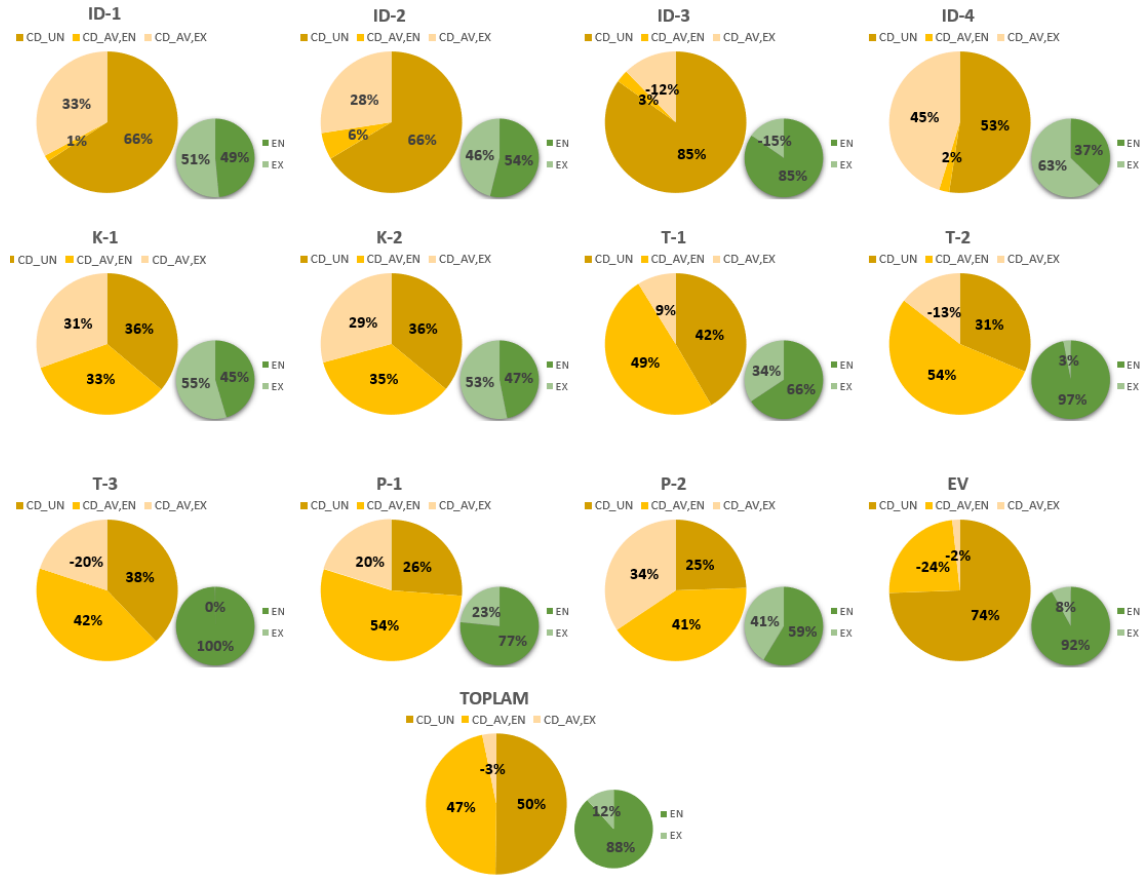
- Sistemin tamamında ekserji yıkım maliyetinde %46 ($\dot{C}_{D,toplam}^{AV}$, 48.78 \$/h) iyileştirme potansiyeli bulunmaktadır.

Çizelge 4.3. Önerilen güç sisteminin bileşenleri için maliyet oranı türleri

Bileşen	$C_{f,k}$ \$/GJ	$C_{p,k}$ \$/GJ	$C_{D,k}$ (\$/h)	$\dot{C}_{D,k}^{EN}$ (\$/h)	$\dot{C}_{D,k}^{EX}$ (\$/h)	$\dot{C}_{D,k}^{UN}$ (\$/h)
ID-1	1.30	1.71	3.57	1.73	1.84	2.34
ID-2	0.10	0.12	3.63	1.96	1.67	2.41
ID-3	0.20	0.26	6.22	7.59	-1.37	7.00
ID-4	0.95	1.27	0.31	0.11	0.19	0.16
K-1	1.49	1.95	0.52	0.24	0.28	0.19
K-2	1.49	1.95	0.78	0.36	0.41	0.28
T-1	0.95	1.49	1.24	0.81	0.42	0.52
T-2	10.64	13.51	50.37	48.84	1.53	22.25
T-3	1.40	1.78	1.91	1.91	0.00	1.20
P-1	13.51	23.41	27.62	21.17	6.47	7.25
P-2	1.78	3.43	0.73	0.43	0.30	0.18
GV	1.30	1.40	8.28	7.62	0.66	12.63
TOPLAM	35.09	52.27	105.18	92.77	12.42	56.41

Çizelge 4.3. Önerilen güç sisteminin bileşenleri için maliyet oranı türleri (Devamı)

Bileşen	$\dot{C}_{D,k}^{AV}$ (\$/h)	$\dot{C}_{D,k}^{UN.EN}$ (\$/h)	$\dot{C}_{D,k}^{UN.EX}$ (\$/h)	$\dot{C}_{D,k}^{AV.EN}$ (\$/h)	$\dot{C}_{D,k}^{AV.EX}$ (\$/h)
ID-1	1.22	1.68	0.66	0.05	1.17
ID-2	1.22	1.73	0.68	0.22	1.00
ID-3	-0.78	7.36	-0.36	0.24	-1.02
ID-4	0.15	0.11	0.05	0.01	0.14
K-1	0.33	0.06	0.12	0.17	0.16
K-2	0.50	0.09	0.19	0.27	0.23
T-1	0.72	0.20	0.32	0.61	0.11
T-2	28.12	10.45	11.81	38.39	-10.28
T-3	0.70	0.57	0.63	1.34	-0.64
P-1	20.39	6.35	0.90	14.82	5.57
P-2	0.55	0.13	0.05	0.30	0.25
GV	-4.34	11.67	0.96	-4.05	-0.29
TOPLAM	48.78	40.40	16.02	52.38	-3.60



Şekil 4.2. Sistem bileşenlerinin kaçınılmaz, kaçınılabılır içsel ve dışsal ekseri yıkım maliyeti oranları

Çizelge 4.4 ve Şekil 4.3, sırasıyla sistem bileşenlerinin yatırım maliyeti bölümlerini sayısal ve yüzdelerle terimler sunar. Birlikte değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilir

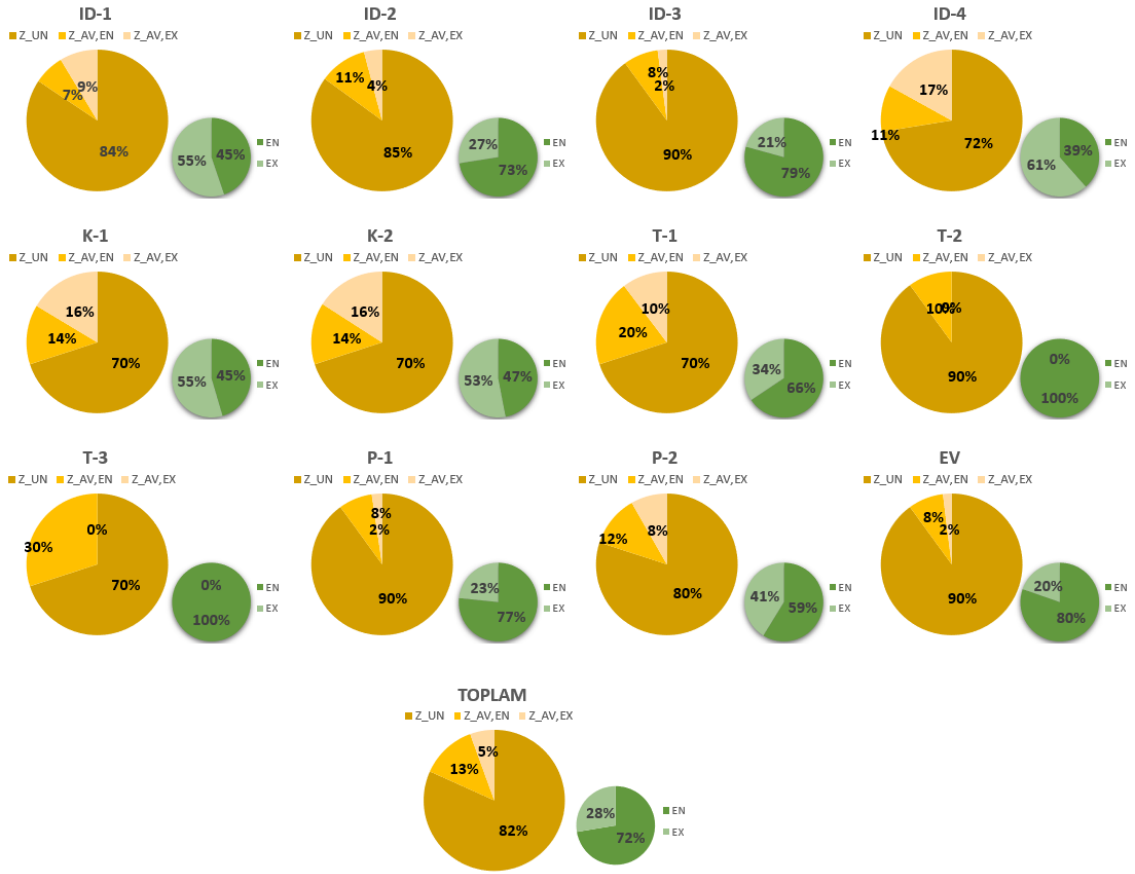
- Geleneksel eksergo-ekonomik analize göre yatırım maliyetini iyileştirmek için odaklanılması gereken sistem bileşenleri sırasıyla P-1 (6.60\$/h), P-2 (4.98 \$/h), ve T-1 (4 \$/h). İleri eksergo-ekonomik analizde sıralama şu şekildedir: T-1 (0.79 \$/h, \dot{Z}_k 'nın %20' si), P-2 (0.59 \$/h, \dot{Z}_k 'nın %12' si), ve T-3 (0.58 \$/h, \dot{Z}_k 'nın %30' u).
- Sistem bileşen ilişkileri açısından, yatırım maliyetlerini azaltmak için odaklanılması gereken bileşenler sırasıyla şunlardır: T-1 (0.41\$/h, \dot{Z}_k 'nın %10' u), P-2 (0.41\$/h, \dot{Z}_k 'nın %8'i), ve P-1 (0.15\$/h, \dot{Z}_k 'nın %2'si). Bu sistem bileşenlerinin yatırım maliyetlerinin azaltılması, diğer sistem bileşenlerinin maliyetlerini de azaltacaktır.
- Genel sistem için \dot{Z}_{toplam}^{AV} değeri 4.64\$/h. Bu değer sistemin tamamı için %18'lik bir iyileştirme potansiyelini göstermektedir.

Çizelge 4.4. Önerilen güç sisteminin bileşenleri için yatırım maliyeti oranı türleri

Bileşen	$\dot{Z}_{D,k}$ [\$/h]	$\dot{Z}_{D,k}^{EN}$ [\$/h]	$\dot{Z}_{D,k}^{EX}$ [\$/h]	$\dot{Z}_{D,k}^{UN}$ [\$/h]	$\dot{Z}_{D,k}^{AV}$ [\$/h]
ID-1	0.95	0.43	0.53	0.80	0.15
ID-2	0.20	0.15	0.06	0.17	0.03
ID-3	1.86	1.47	0.39	1.67	0.19
ID-4	0.36	0.14	0.22	0.26	0.10
K-1	0.58	0.26	0.31	0.40	0.17
K-2	0.87	0.41	0.46	0.61	0.26
T-1	4.00	2.62	1.38	2.80	1.20
T-2	2.71	2.71	0.00	2.44	0.27
T-3	1.93	1.93	0.00	1.35	0.58
P-1	6.60	5.06	1.54	5.94	0.66
P-2	4.98	2.93	2.05	3.99	1.00
GV	0.32	0.25	0.06	0.28	0.03
TOPLAM	25.36	18.36	7.00	20.72	4.64

Çizelge 4.4. Önerilen güç sisteminin bileşenleri için yatırım maliyeti oranı türleri

Bileşen	(Devamı)			
	$\dot{Z}_{D,k}^{UN,EN}$ [\$/h]	$\dot{Z}_{D,k}^{UN,EX}$ [\$/h]	$\dot{Z}_{D,k}^{AV,EN}$ [\$/h]	$\dot{Z}_{D,k}^{AV,EX}$ [\$/h]
ID-1	0.36	0.44	0.07	0.08
ID-2	0.13	0.05	0.02	0.01
ID-3	1.33	0.35	0.15	0.04
ID-4	0.10	0.16	0.04	0.06
K-1	0.18	0.22	0.08	0.09
K-2	0.28	0.32	0.12	0.14
T-1	1.84	0.96	0.79	0.41
T-2	2.44	0.00	0.27	0.00
T-3	1.35	0.00	0.58	0.00
P-1	4.55	1.39	0.51	0.15
P-2	2.34	1.64	0.59	0.41
GV	0.23	0.06	0.03	0.01
TOPLAM	15.13	5.59	3.23	1.41



Şekil 4.3. Sistem bileşenlerinin kaçınılmaz, kaçınılabılır içsel ve dışsal yatırım oranları

Çizelge 4.5 ve Şekil 4.4, sistem bileşenlerinin ($\dot{B}_{D,k}$) ekserji yıkım oranlarının çevresel etkisini sırasıyla sayısal ve yüzdesel olarak göstermektedir. Birlikte değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir.

- Geleneksel eksergo-çevresel analize göre, ekserji yıkımına bağlı çevresel etkileri azaltmak için odaklanılması gereken sistem bileşenleri şunlardır: GV (32427.11 mPts/h), ID-3 (24283.45 mPts/h), T-2 (23376.49 mPts/h), ID-1 (13967.47 mPts/h) ve ID-2 (10884.85 mPts/h). İleri eksergo-çevresel ekserji analizinde bu sıralama şu şekildedir: T-2 (17817.69 mPts/h, $\dot{B}_{D,k}$ 'nin %76'sı), T-3 (5231.52 mPts/h, $\dot{B}_{D,k}$ 'nin %70'i), ve P-1 (3533.18 mPts/h, $\dot{B}_{D,k}$ 'nin %54'ü).
- Sistem bileşen ilişkileri açısından, ekserji yıkımından kaynaklanan çevresel etkileri azaltmak için odaklanılması gereken bileşenler şunlardır: ID-1 (4587.43 mPts/h, $\dot{B}_{D,k}$ 'nin %33'ü), ID-2 (2988.86 mPts/h, $\dot{B}_{D,k}$ 'nin %28'i), ve P-1 (1327.70 mPts/h, $\dot{B}_{D,k}$ 'nin %20'si). Diğer sistem bileşenlerinde yapılan herhangi bir iyileştirme, bunların çevresel etkilerini de azaltacaktır. Ancak, T-2 (-4769.52 mPts/h) ve ID-3 (-3968.46 mPts/h) gibi negatif $\dot{B}_{D,k}^{AV,EX}$ değerine sahip sistem

bileşenleri için durum tersine dönmektedir. Bu durumlarda, yapılan herhangi bir iyileştirme, diğer sistem bileşenlerinin ekserji yıkımıyla ilişkili çevresel etkilerini artıracaktır.

- Sistemin genel $\dot{B}_{D,toplam}^{AV}$ değeri 14454.96 mPts/h. Bu değer sistemde %22'lik bir iyileştirmeyi temsil eder.

Çizelge 4.5. Ekserji yıkımının ileri eksergo-çevresel etkisi

Bileşen	$b_{f,k}$ (mPts/ GJ)	$b_{p,k}$ (mPts/ GJ)	$\dot{B}_{D,k}$ (mPts/h)	$\dot{B}_{D,k}^{EN}$ (mPts/h)	$\dot{B}_{D,k}^{EX}$ (mPts/h)	$\dot{B}_{D,k}^{UN}$ (mPts/h)
ID-1	5089.00	6343.00	13967.47	6771.22	7188.92	9178.52
ID-2	290.70	353.70	10884.85	5863.65	5020.16	7228.31
ID-3	763.40	961.90	24283.45	29650.76	-5367.31	27331.25
ID-4	2840.00	3288.00	922.10	343.02	579.19	483.60
K-1	3221.00	3697.00	1123.03	510.32	613.29	405.85
K-2	3221.00	3697.00	1684.84	791.40	896.92	607.61
T-1	2840.00	3221.00	3718.47	2438.42	1272.89	1543.82
T-2	4938.00	6206.00	23376.49	22665.42	711.07	10328.32
T-3	5457.00	6206.00	7453.39	7453.39	-7.86	4695.20
P-1	3221.00	5128.00	6585.14	5046.41	1542.21	1727.74
P-2	3221.00	3605.00	1324.22	778.41	549.28	324.68
GV	5089.00	5457.00	32427.11	29843.93	2601.50	49446.76
TOPLAM	40191.10	48163.60	127750.5697	112156.35	15600.27	113301.66

Çizelge 4.5. Ekserji yıkımının ileri eksergo-çevresel etkisi (Devamı)

Bileşen	$\dot{B}_{D,k}^{AV}$ (mPts/h)	$\dot{B}_{D,k}^{UN,EN}$ (mPts/h)	$\dot{B}_{D,k}^{UN,EX}$ (mPts/h)	$\dot{B}_{D,k}^{AV,EN}$ (mPts/h)	$\dot{B}_{D,k}^{AV,EX}$ (mPts/h)
ID-1	4781.62	6577.02	2601.50	194.20	4587.43
ID-2	3655.49	5197.02	2031.30	666.63	2988.86
ID-3	-3047.80	28730.10	-1398.85	920.66	-3968.46
ID-4	438.61	321.54	162.05	21.47	417.14
K-1	717.77	134.86	270.99	375.47	342.30
K-2	1080.71	203.97	403.64	587.43	493.28
T-1	2167.49	598.51	945.31	1839.91	327.58
T-2	13048.17	4847.73	5480.59	17817.69	-4769.52
T-3	2750.33	2221.87	2473.33	5231.52	-2481.19
P-1	4860.88	1513.23	214.52	3533.18	1327.70
P-2	1003.02	232.14	92.53	546.27	456.75
GV	-17001.33	45691.08	3755.68	-15847.15	-1154.19
TOPLAM	14454.96	96269.08	17032.58	15887.28	-1432.32



Şekil 4.4. Sistem bileşenlerinin ekserji yıkım oranlarının kaçınılmaz, kaçınılmaz içsel ve dışsal çevresel etkileri

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.5, sistem bileşenlerinin (\dot{Y}_k) çevresel etkisini sırasıyla sayısal ve yüzdelerle sunmaktadır. Birlikte değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir:

- Hem geleneksel ekserji-çevresel analiz hem de ileri ekserji-çevresel analizde odaklanılacak sistem bileşenleri aynıdır. Geleneksel ekserji-çevresel analizinde en yüksek \dot{Y}_k değerlerine sahip bileşenler T-2 (70.16 mPts/h), T-3 (44.82 mPts/h), ve ID-3 (21.47 mPts/h). İleri ekserji-çevresel analizinde en yüksek $\dot{Y}_k^{AV,EN}$ değerlerine sahip bileşenler T-2 (25.34 mPts/h, \dot{Y}_k 'nin %36'sı), T-3 (16.17 mPts/h, \dot{Y}_k 'nin %36'sı), ve ID-3 (11.71 mPts/h, \dot{Y}_k 'nin %55'i).
- Sistem bileşenleri bazında değerlendirildiğinde en yüksek $\dot{Y}_k^{AV,EX}$ değerlerine sahip bileşenler ID-1 (4.16 mPts/h, \dot{Y}_k 'nin %38'i) ve ID-3 (3.06 mPts/h, \dot{Y}_k 'nin %14'ü). Bu sistem bileşenlerinde yapılacak iyileştirmeler diğer sistem bileşenlerinin çevresel etkilerini de azaltacaktır.

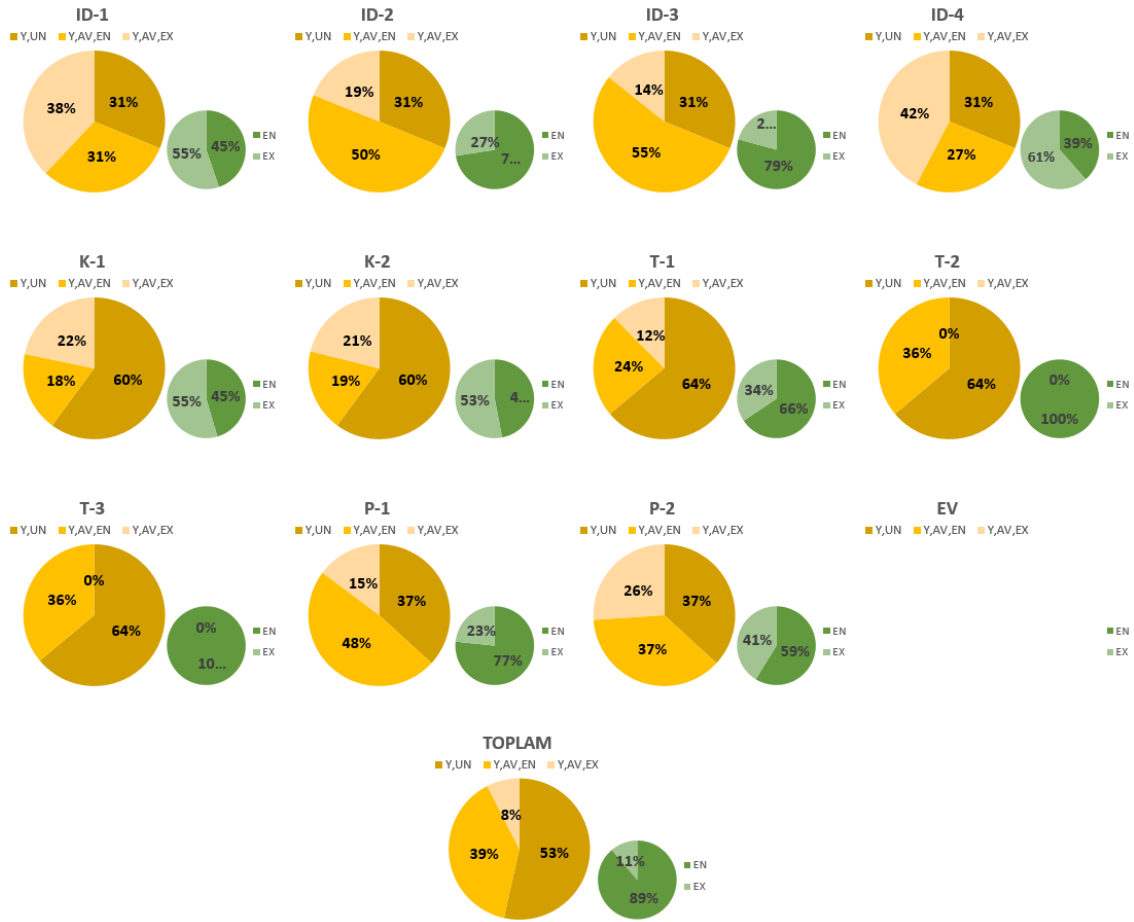
- Sistem için genel $\dot{Y}_{\text{toplam}}^{AV}$ değeri 80.52 mPts/h. Bu değer, sistem bileşenlerinin neden olduğu çevresel etkiyi %47 oranında iyileştirme potansiyeline işaret etmektedir.

Çizelge 4.6. İleri eksergo-çevresel analiz için bileşenle ilgili çevresel etki oranları

Bileşen	\dot{Y}_k (mPts/h)	\dot{Y}_k^{EN} (mPts/h)	\dot{Y}_k^{EX} (mPts/h)	\dot{Y}_k^{UN} (mPts/h)	\dot{Y}_k^{AV} (mPts/h)
ID-1	10.96	4.91	6.05	3.42	7.54
ID-2	10.32	7.49	2.84	3.22	7.10
ID-3	21.47	17.02	4.45	6.69	14.77
ID-4	4.01	1.55	2.47	1.25	2.76
K-1	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
K-2	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01
T-1	1.40	0.92	0.48	0.90	0.51
T-2	70.16	70.16	0.00	44.82	25.34
T-3	44.82	44.82	0.00	28.65	16.17
P-1	5.83	4.47	1.36	2.14	3.68
P-2	4.13	2.43	1.70	1.52	2.61
GV	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TOPLAM	173.16	153.78	19.38	92.64	80.52

Çizelge 4.6. İleri eksergo-çevresel analiz için bileşenle ilgili çevresel etki oranları (Devamı)

Bileşen	$\dot{Y}_k^{UN,EN}$ (mPts/h)	$\dot{Y}_k^{UN,EX}$ (mPts/h)	$\dot{Y}_k^{AV,EN}$ (mPts/h)	$\dot{Y}_k^{AV,EX}$ (mPts/h)
ID-1	1.53	1.89	3.38	4.16
ID-2	2.33	0.88	5.15	1.95
ID-3	5.31	1.39	11.71	3.06
ID-4	0.48	0.77	1.06	1.70
K-1	0.01	0.01	0.00	0.00
K-2	0.01	0.01	0.01	0.01
T-1	0.59	0.31	0.33	0.17
T-2	44.82	0.00	25.34	0.00
T-3	28.65	0.00	16.17	0.00
P-1	1.64	0.50	2.82	0.86
P-2	0.89	0.63	1.53	1.08
GV	0.00	0.00	0.00	0.00
TOPLAM	86.26	6.38	67.52	13.00

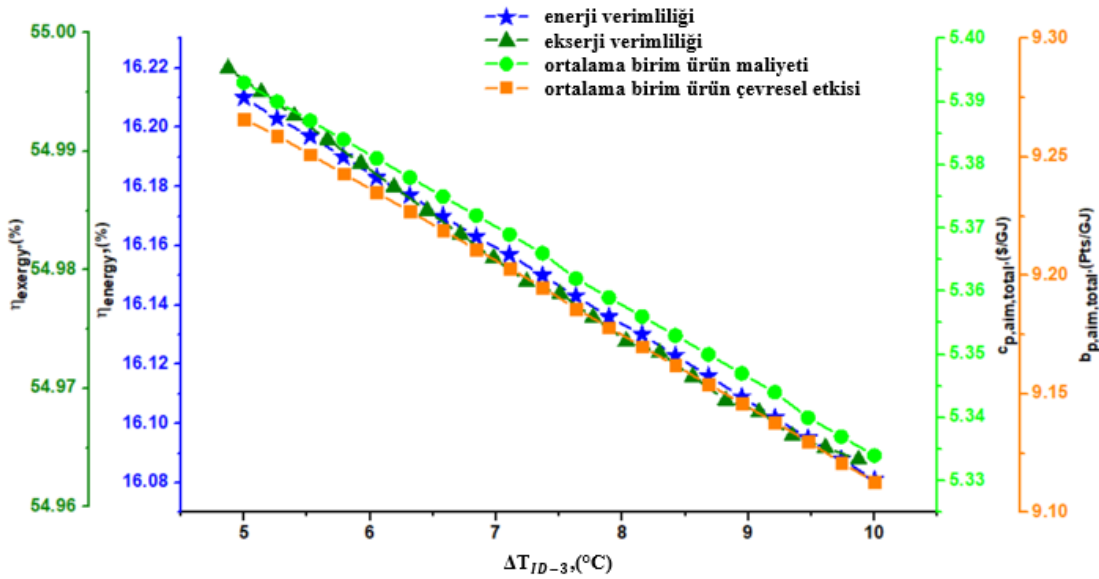


Şekil 4.5. Sistem bileşenlerinin kaçınılmaz, kaçınılabılır içsel ve dışsal çevresel etkileri

4.1. Önerilen Güç Sisteminin Duyarlılık Analizi

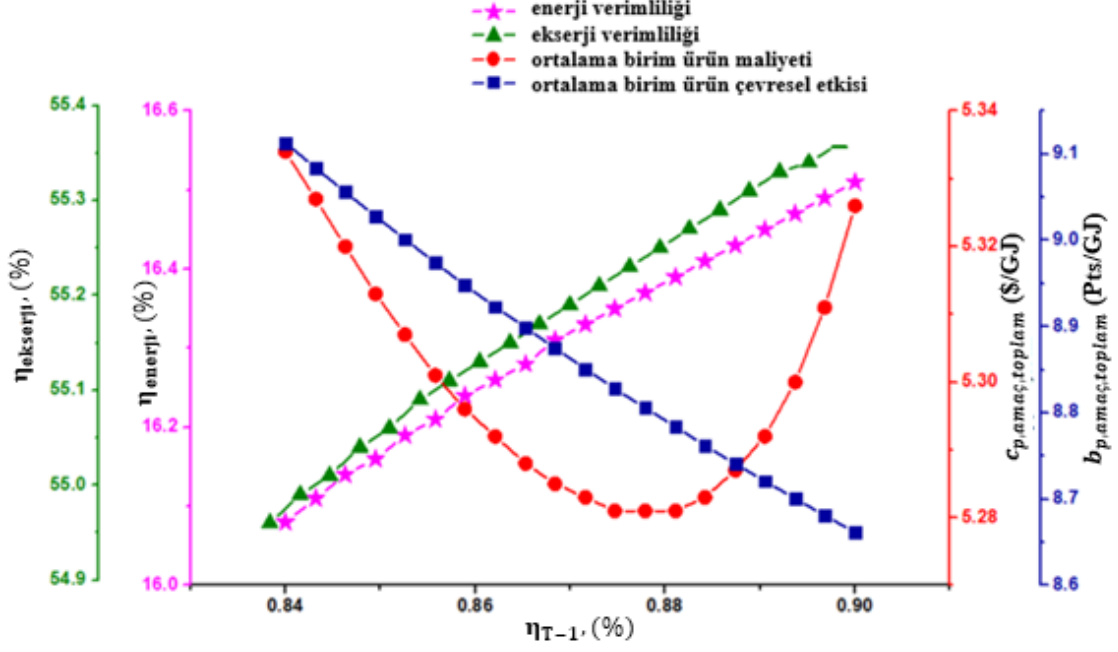
Şekil 4.6, ID-3'teki sıcaklık farkının η_{enerji} , η_{ekserji} , $c_{p,\text{amaç,toplam}}$ ve $h_{p,\text{amaç,toplam}}$ üzerindeki etkilerini göstermektedir. ID-3'teki sıcaklık farkının artışı η_{enerji} ve η_{ekserji} değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Bunun nedeni, ID-3'ün ısı yükündeki azalmanın akış 6'nın ve dolayısıyla akış 9'un özgül entalpilerinde düşüğe yol açmasıdır. Bu durum, jeotermal kaynaktan tüm sisteme sağlanan enerjinin artmasına neden olmuş, ancak net güç (\dot{W}_{net}) sabit kaldığından dolayı η_{enerji} ve η_{ekserji} değerleri düşmüştür. ID-3'teki sıcaklık farkının artması aynı zamanda akış 13'ün özgül entalpisini azaltmış, bu da \dot{W}_{net} sabit tutulduğunda doğal gaz (NG) debisinin artmasına yol açmıştır. Bu durum, akış 14'ün ekserji oranı ($\dot{E}x_{14}$) üzerinde bir artışa neden olmuştur. Ayrıca, $\dot{E}x_{14}$ 'teki bu artış, akış 13'ün sisteme daha düşük özgül entropiyle girmesinden de

kaynaklanmaktadır. Bu iki etken, $\dot{E}x_{14}$ 'ün artmasına katkı sağlarken, aynı zamanda $c_{p,amaç,toplam}$ ve $b_{p,amaç,toplam}$ değerlerinde düşüşe neden olmuştur.



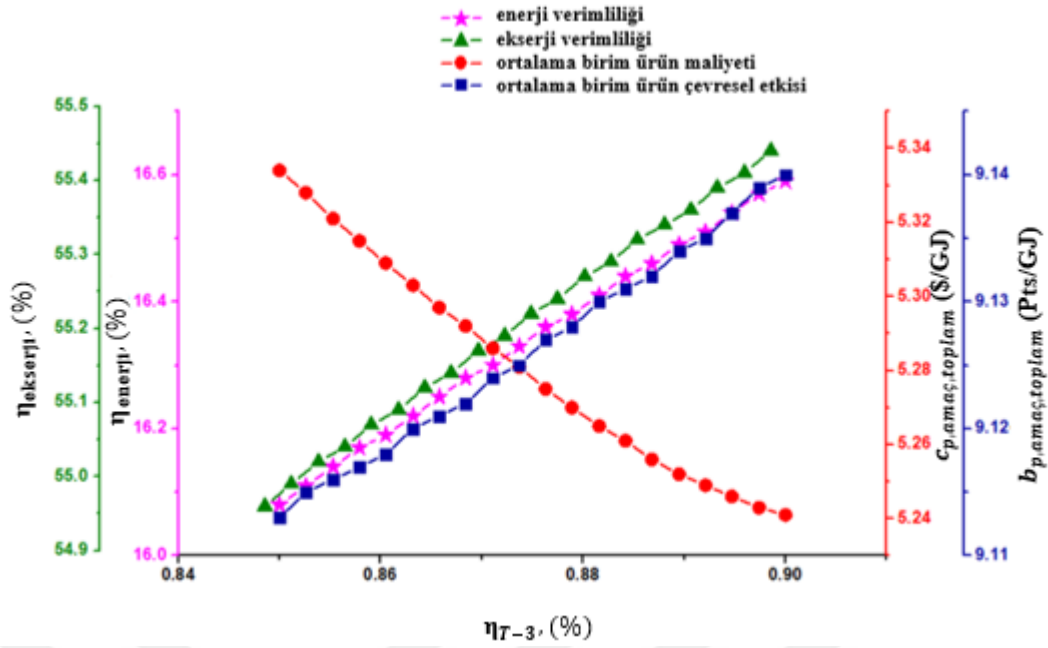
Şekil 4.6. ID-3'teki sıcaklık farkının tüm sistemin performans kriterleri üzerindeki etkisi

Şekil 4.7, T-1 verimindeki değişimlerin sistemin performans kriterleri üzerindeki etkisini göstermektedir. T-1'nin verimi arttıkça, η_{enerji} ve $\eta_{ekserji}$ parametreleri de artmaktadır. T-1 verimindeki artış, net güç \dot{W}_{net} sabit kalmak kaydıyla jeotermal kaynağın debisini (\dot{m}_1) azaltmaktadır. \dot{m}_1 'in azalması ise η_{enerji} ve $\eta_{ekserji}$ 'nin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, T-1 verimi arttıkça $c_{p,amaç,toplam}$ değeri %88.11 seviyesine kadar düşmekte, bu noktadan sonra ise yeniden artış göstermektedir. Bu eğilim şu şekilde açıklanabilir: T-1 veriminin azalması, net güç sabit olduğundan dolayı akış 23'ün debisini (\dot{m}_{23}), azaltmaktadır. T-1'in yatırım maliyetini temsil eden Z'nin hesaplandığı denklemde, debideki azalma Z'yi düşürücü etki yaparken, T-1 verimindeki artış ise Z'yi artırıcı etki yapmaktadır. Bu nedenle, %88.11 verim seviyesine kadar olan $c_{p,amaç,toplam}$ azalması, \dot{m}_{23} 'teki azalmanın T-1 verimindeki artışa göre daha baskın etkisinden kaynaklanmaktadır. Ancak bu eşik aşıldığında eğilim tersine dönmektedir. T-1 verimi %88.11'in üzerine çıktığında, T-1 verimi artmaya devam ederken $b_{p,amaç,toplam}$ değeri azalmaktadır. Bu durum, T-1 verimindeki artışın hem sisteme ait toplam çevresel etkiyi hem de besleme kaynağına ait çevresel etkiyi azaltmasıyla açıklanabilir.



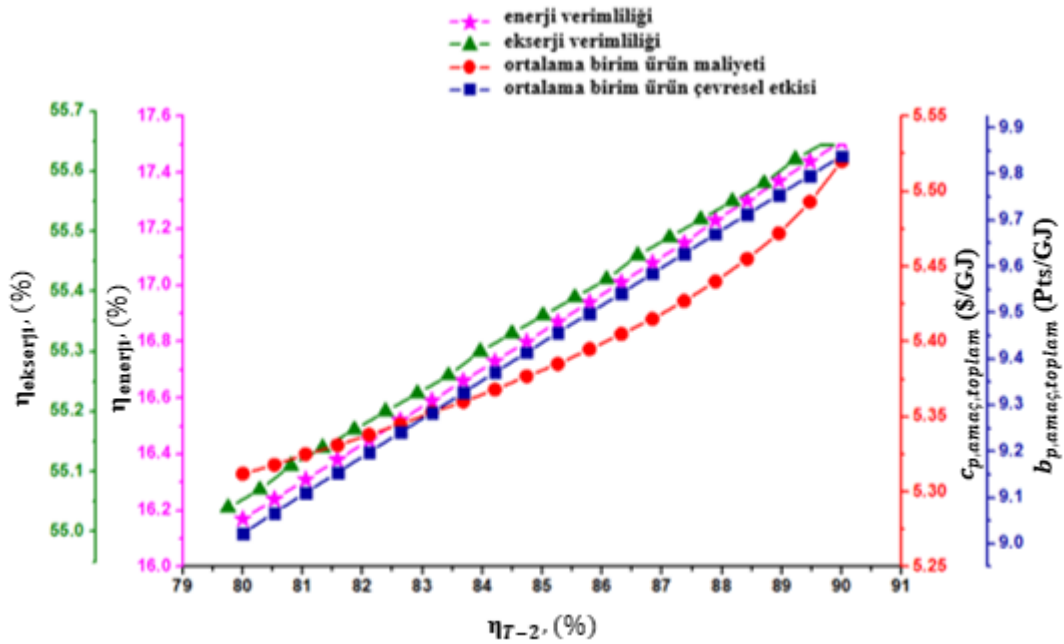
Şekil 4.7. T-1 verimliliğinin genel sistem performans kriterleri üzerindeki etkisi

Şekil 4.8, T-3'ün izentropik veriminin sistemin performans kriterleri üzerindeki etkisini göstermektedir. T-3 verimindeki artış, hem η_{enerji} ve $\eta_{ekserji}$ değerlerinde bir artışa yol açmıştır. T-3 verimi arttıkça, net güç \dot{W}_{net} sabit tutulduğunda jeotermal kütle akış hızı (\dot{m}_1) azalmaktadır; bu da hem η_{enerji} hem de $\eta_{ekserji}$ 'yi artırmaktadır. T-3 verimindeki iyileşme ile besleme ekserjisinin maliyet oranı ($\dot{C}_{f,toplam}$) azalmaktadır. Sistemin toplam yatırım maliyeti oranı (\dot{Z}_{toplam}) artmasına rağmen, CF'deki baskın azalma $c_{p,amaç,toplam}$ değerinin düşmesine yol açmaktadır. Diğer taraftan, $b_{p,amaç,toplam}$ değerinde ters bir eğilim gözlemlenmektedir. Besleme ekserjisinin çevresel etki oranındaki ($\dot{B}_{f,toplam}$) artış, sistemin genel bileşenlerinden kaynaklanan çevresel etki oranındaki (\dot{Y}_{toplam}) azalmayı aşmakta ve bu da $b_{p,amaç,toplam}$ 'in artmasına yol açmaktadır.



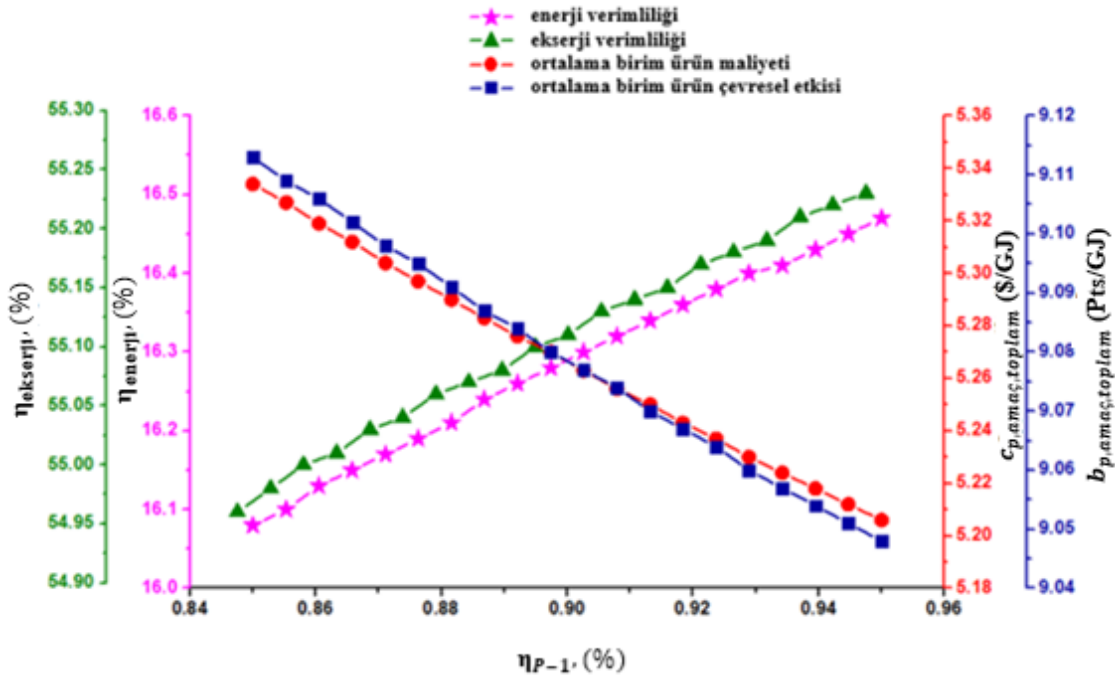
Şekil 4.8. ID-3'teki Sıcaklık Farkının Tüm Sistem Performans Kriterleri Üzerindeki Etkisi

Şekil 4.9, T-2 veriminin sistemin performans kriterleri üzerindeki etkisini göstermektedir. T-2 verimi arttıkça, hem η_{enerji} hem de $\eta_{ekserji}$ değerlerinde bir artış gözlemlenmektedir. Bu, net güç \dot{W}_{net} sabit tutulduğunda LNG kütle akış hızındaki (\dot{m}_{10}) azalma etkisiyle açıklanabilir. Bu durum, Akış 6'nın ve dolayısıyla Akış 9'un özgül entalpisinin artmasına yol açmaktadır. T-2 verimi arttıkça, T-2 türbininden çıkan akışın ekserji oranı (Akış 14, $\dot{E}x_{14}$) azalır ve bu da hem $b_{p,amaç,toplam}$ hem de $C_{p,amaç,toplam}$ değerlerinin artmasına neden olur.



Şekil 4.9. ID-3'teki sıcaklık farkının genel sistemin performans kriterleri üzerindeki etkisi

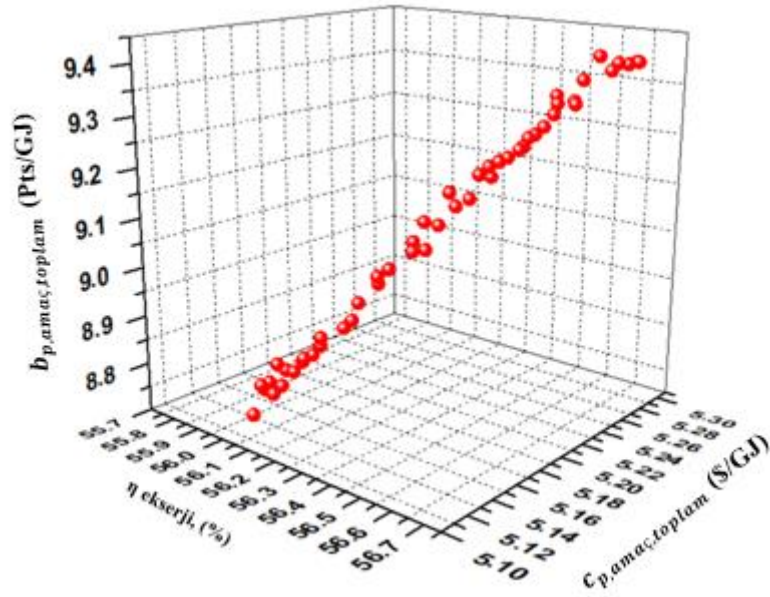
Şekil 4.10, P-1 verimindeki değişikliğin sistem performansı üzerindeki etkisini göstermektedir. P-1 verimi arttıkça, P-1'den çıkan Akış 11'in özgül entalpisi düşer. Bu durum, hem h_6 hem de h_9 değerlerinde bir azalmaya yol açar. Sonuç olarak, h_9 'daki azalma, $\dot{E}x_9$ 'da bir azalmaya yol açar ve bu da η_{enerji} ve η_{ekserji} değerlerinin artmasına neden olur. P-1 verimi arttıkça, $\dot{B}_{f,\text{toplam}}$, \dot{Y}_{toplam} , $\dot{C}_{f,\text{toplam}}$ ve \dot{Z}_{toplam} değerleri düşer; bu da $b_{p,\text{amaç,toplam}}$ ve $c_{p,\text{amaç,toplam}}$ değerlerinde bir azalmaya yol açar.



Şekil 4.10. ID-3'teki sıcaklık farkının genel sistem performans kriterleri üzerindeki etkisi

4.2. Önerilen Güç Sisteminin Çok Amaçlı Optimizasyon Çalışması

Şekil 4.11, NSGA-II optimizasyon sürecinden elde edilen Pareto ön yüzünü göstermektedir ve bu ön yüz, hedef fonksiyonlar arasındaki dengeyi sergilemektedir. Şekil, hem η_{ekserji} değerinin maksimumlaştırılması hem de $b_{p,\text{amaç,toplam}}$ ve $c_{p,\text{amaç,toplam}}$ değerlerinin minimize edilmesi açısından optimal çözümleri vurgulamaktadır. Bu çözümler, sistemin en iyi performans gösteren yapılandırmalarını temsil etmekte olup, Pareto ön yüzündeki her bir nokta, dikkate alınan hedeflerin belirli bir dengeye karşılık gelmektedir. Optimal çözümler, bir hedefteki performansın diğerinde bir taviz verilmeden iyileştirilemeyeceği çözümler olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, Pareto ön yüzündeki en iyi nokta, TOPSIS (İdeal Çözümüne Benzerliğe Göre Tercih Sıralama Yöntemi) yöntemi kullanılarak seçilmiş ve karar değişkenlerinin karşılık gelen değerleri Çizelge 4.7.'de sunulmuştur.



Şekil 4.11. Önerilen Sistemin Pareto Sınırı Dağılımı

Çizelge 4.7. Sistemin Optimizasyon Sonuçları ile Temel Durumunun Karşılaştırılması

Karar Değişkeni	Temel Durum Girdi Verisi	Optimize Durum Girdi Verisi	Performans Kriteri	Temel Durum Çıktı Verisi	Optimize Çıktı Girdi Verisi	İyileşme Oranı %
ID-3 için ΔT , °C	10	9	$b_{p,amaç,toplam}$ \$/GJ	9.11	8.70	4.50
η_{T-1} , %	84	89	$c_{p,amaç,toplam}$ \$/GJ	5.33	5.10	4.32
η_{T-3} , %	85	89	η_{enerji} %	16.08	17.23	7.15
η_{T-2} , %	80	80	$\eta_{ekserji}$ %	54.96	55.94	1.78
η_{P-1} , %	85	94	$b_{p,amaç,toplam}^a$ \$/GJ	8.08	7.65	5.32
			$c_{p,amaç,toplam}^a$ \$/GJ	4.63	4.38	5.40
			$\eta_{ekserji}^{adv}$ %	89.49	91.33	2.06

5. SONUÇ

Bu çalışmada, jeotermal enerji ısı kaynağı ve LNG'nin soğuk enerjisi ise ısı kuyusu olarak kullanılan bir tekrar sıkıştırımlı süperkritik CO₂ (S-CO₂) çevrimi tasarlanmıştır. Önerilen sistemin performansı, ileri ekserji tabanlı analiz teknikleri ile değerlendirilmiştir. Ayrıca çalışmada duyarlılık analizi ve çok amaçlı optimizasyon çalışması yapılmıştır. Çok amaçlı optimizasyon çalışmasında NSGA-II yöntemi kullanılmıştır. Yapılan analizlerden elde edilen temel bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- İleri ekserji analizine göre, sistem bileşenlerinden en yüksek iyileştirme potansiyeline sahip olanlar sırasıyla doğal gaz türbini (T-2) (1002.30 kW, $\dot{E}x_{D,k}$ 'nin %76'sı), ısı değiştirici-2 (ID-2) (637 kW, $\dot{E}x_{D,k}$ 'nin %6'sı), ısı değiştirici -3 (ID-3) (335 kW, $\dot{E}x_{D,k}$ 'nin %3'ü) ve sıvılaştırılmış doğal gaz pompası (P-1) (304.7 kW, $\dot{E}x_{D,k}$ 'nin %54'ü) olarak belirlenmiştir. Sistemin genel iyileştirme potansiyeli, ekserji yıkımı açısından %14 olarak hesaplanmıştır.
- İleri eksergo-ekonomik analizine göre, ekserji yıkımı maliyeti açısından en yüksek iyileştirme potansiyeline sahip bileşenler sırasıyla doğal gaz türbini (T-2) (38.39 \$/h, $\dot{C}_{D,k}$ 'nin %76'sı), sıvılaştırılmış doğal gaz pompası (P-1) (14.82 \$/h, $\dot{C}_{D,k}$ 'nin %54'ü), ve jeotermal türbin (T-3) (1.34 \$/h, $\dot{C}_{D,k}$ 'nin %70'i) olarak belirlenmiştir. Bu açıdan sistemin toplam iyileşme potansiyeli %46 olarak hesaplanmıştır.
- İleri eksergo-ekonomik analizde, sistem bileşenlerinin yatırım maliyetleri açısından en yüksek iyileştirme potansiyeline sahip bileşenler sırasıyla CO₂ türbini (T-1) (0.79 \$/h, \dot{Z}_k 'nin %20'si), jeotermal pompa (P-2) (0.59 \$/h, \dot{Z}_k 'nin %12'si), ve jeotermal türbin (T-3) (0.58 \$/h, \dot{Z}_k 'nin %30'u) olarak belirlenmiştir. Bu açıdan sistemin genel iyileşme potansiyeli %18 olarak hesaplanmıştır.
- İleri eksergo-çevresel analizde, ekserji yıkımı nedeniyle çevresel etki açısından en yüksek iyileştirme potansiyeline sahip bileşenler sırasıyla doğal gaz türbini (T-2) (17817.69 mPts/h, $\dot{B}_{D,k}$ 'nin %76'sı). İleri eksergo-çevresel analizde, ekserji yıkımı nedeniyle çevresel etki açısından en yüksek iyileştirme potansiyeline sahip bileşenler sırasıyla doğal gaz türbini (T-3) (5231.52 mPts/h, $\dot{B}_{D,k}$ 'nin %70'i), ve sıvılaştırılmış doğal gaz pompası (P-1) (3533.18 mPts/h, $\dot{B}_{D,k}$ 'nin %54'ü) olarak belirlenmiştir. Bu açıdan sistemin genel iyileşme potansiyeli %22 olarak hesaplanmıştır.

- İleri eksergo-çevresel analizde, sistem bileşenlerinin çevresel etki açısından en yüksek iyileştirme potansiyeline sahip bileşenler sırasıyla doğal gaz türbini (T-2) (25.34 mPts/h, \dot{Y}_k 'nin %36'sı), jeotermal türbin (T-3) (16.17 mPts/h, \dot{Y}_k 'nin %36'sı), ve ısı değiştirici-3 (ID-3) (11.71 mPts/h, \dot{Y}_k 'nin %55'i) olarak belirlenmiştir. Bu açıdan sistemin genel iyileşme potansiyeli %47 olarak hesaplanmıştır.
- NSGA-II yöntemi kullanılarak yapılan çok amaçlı optimizasyon çalışması sonucunda aşağıdaki performans kriterlerinde iyileşme sağlanmıştır: $b_{p,amaç,toplam}$ (%4.50 iyileştirme oranı), $c_{p,amaç,toplam}$ (%4.32 iyileştirme oranı), η_{enerji} (%7.15 iyileştirme oranı), $\eta_{ekserji}$ (%1.78 iyileştirme oranı), $b_{p,amaç,toplam}$ (%5.32 iyileştirme oranı), $c_{p,amaç,toplam}$ (%5.40 iyileştirme oranı) ve, $\eta_{ekserji}^{adv}$ (%2.06 iyileştirme oranı).

Sonuçlar, önerilen S-CO₂ çevrimi sisteminin enerji verimliliği, maliyet etkinliği ve çevresel etkiler açısından önemli iyileştirmeler sunduğunu ve daha sürdürülebilir çözümler için potansiyel taşıdığını göstermektedir.

6. KAYNAKÇALAR

- Açikkalp, Emin, Haydar Aras, ve Arif Hepbasli. 2014. "Advanced exergy analysis of an electricity-generating facility using natural gas". *Energy Conversion and Management* 82:146-53. doi:10.1016/j.enconman.2014.03.006.
- Ahmadi, Mohammad H., Mehdi Mehrpooya, Sara Abbasi, Fathollah Pourfayaz, ve Joan Carles Bruno. 2017. "Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of a transcritical CO₂ power cycle driven by solar energy and LNG cold recovery". *Thermal Science and Engineering Progress* 4:185-96. doi:10.1016/j.tsep.2017.10.004.
- Ahmadi, Mohammad H., Mehdi Mehrpooya, ve Fathollah Pourfayaz. 2016a. "Exergoeconomic analysis and multi objective optimization of performance of a Carbon dioxide power cycle driven by geothermal energy with liquefied natural gas as its heat sink". *Energy Conversion and Management* 119:422-34. doi:10.1016/j.enconman.2016.04.062.
- Ahmadi, Mohammad H., Mehdi Mehrpooya, ve Fathollah Pourfayaz. 2016b. "Thermodynamic and exergy analysis and optimization of a transcritical CO₂ power cycle driven by geothermal energy with liquefied natural gas as its heat sink". *Applied Thermal Engineering* 109:640-52. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.08.141.
- Almutairi, Khalid. 2023. "Environmentally friendly utilization of LNG regasification process and geothermal-based dual-loop power cycle for desalinated water and hydrogen production". *Desalination* 564. doi:10.1016/j.desal.2023.116808.
- Ansarinasab, Hojat, Hassan Hajabdollahi, ve Manal Fatimah. 2021. "Life cycle assessment (LCA) of a novel geothermal-based multigeneration system using LNG cold energy- integration of Kalina cycle, stirling engine, desalination unit and magnetic refrigeration system". *Energy* 231. doi:10.1016/j.energy.2021.120888.
- Aryanfar, Yashar, Soheil Mohtaram, Jorge Luis García Alcaraz, ve Hong Guang Sun. 2023. "Energy and exergy assessment and a competitive study of a two-stage ORC for recovering SFGC waste heat and LNG cold energy". *Energy* 264. doi:10.1016/j.energy.2022.126191.
- Atienza-Márquez, Antonio, Joan Carles Bruno, Atsushi Akisawa, ve Alberto Coronas. 2019. "Performance analysis of a combined cold and power (CCP) system with exergy recovery from LNG-regasification". *Energy* 183:448-61. doi:10.1016/j.energy.2019.06.153.
- Bahadori, Alireza. 2014a. "Liquefied Natural Gas (LNG)". Ss. 591-632 içinde *Natural Gas Processing*. Elsevier.
- Bahadori, Alireza. 2014b. "Overview of Natural Gas Resources". Ss. 1-22 içinde *Natural Gas Processing*. Elsevier.
- Baldvinsson, Ivar, ve Toshihiko Nakata. 2014. "A comparative exergy and exergoeconomic analysis of a residential heat supply system paradigm of Japan and local source based district heating system using SPECO (specific exergy cost) method". *Energy* 74(C):537-54. doi:10.1016/j.energy.2014.07.019.
- Bayat, Delaram, Mohammad Sharifian, ve Hossein Khajehpour. 2025. "Comprehensive 4E (energy, exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental) analysis and optimization of wastewater sludge gasification: A case study in a resource-constrained area". *Energy* 317. doi:10.1016/j.energy.2025.134633.
- Cao, Yan, Hayder A. Dhahad, Hussein Togun, Hasanen M. Hussen, Ali E. Anqi, Naeim Farouk, ve Alibek Issakhov. 2021a. "Feasibility investigation of a novel geothermal-based integrated energy conversion system: Modified specific exergy

- costing (M-SPECO) method and optimization”. *Renewable Energy* 180:1124-47. doi:10.1016/j.renene.2021.08.075.
- Cao, Yan, Hayder A. Dhahad, Hussein Togun, Hasanen M. Hussen, Ali E. Anqi, Naeim Farouk, ve Alibek Issakhov. 2021b. “Feasibility investigation of a novel geothermal-based integrated energy conversion system: Modified specific exergy costing (M-SPECO) method and optimization”. *Renewable Energy* 180:1124-47. doi:10.1016/j.renene.2021.08.075.
- Cavalcanti, Eduardo José Cidade. 2017a. “Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of an integrated solar combined cycle system”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67:507-19.
- Cavalcanti, Eduardo José Cidade. 2017b. “Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of an integrated solar combined cycle system”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67:507-19.
- Chen, Chaonan, Hailin Mu, Hongye Wang, Nan Li, Xunwen Zhao, ve Quan Liu. 2025. “Performance enhancement of LNG cold-energy-generation ORC system with liquid-separation evaporator: Thermal economic analysis of dual-stage condensation ORC”. *Applied Thermal Engineering* 265. doi:10.1016/j.applthermaleng.2025.125554.
- Dutta, Arnab, Iftekhar A. Karimi, ve Shamsuzzaman Farooq. 2018. “Economic Feasibility of Power Generation by Recovering Cold Energy during LNG (Liquefied Natural Gas) Regasification”. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 6(8):10687-95. doi:10.1021/acssuschemeng.8b02020.
- Ebadollahi, Mohammad, Hadi Rostamzadeh, Mona Zamani Pedram, Hadi Ghaebi, ve Majid Amidpour. 2019. “Proposal and assessment of a new geothermal-based multigeneration system for cooling, heating, power, and hydrogen production, using LNG cold energy recovery”. *Renewable Energy* 135:66-87. doi:10.1016/j.renene.2018.11.108.
- Emadi, Mohammad Ali, ve Javad Mahmoudimehr. 2019. “Modeling and thermo-economic optimization of a new multi-generation system with geothermal heat source and LNG heat sink”. *Energy Conversion and Management* 189:153-66. doi:10.1016/j.enconman.2019.03.086.
- Fallah, M., Z. Mohammadi, ve S. M. Seyed Mahmoudi. 2022. “Advanced exergy analysis of the combined S-CO₂/ORC system”. *Energy* 241. doi:10.1016/j.energy.2021.122870.
- Fang, Zhenhua, Zhen Pan, Guiyang Ma, Jingxian Yu, Liyan Shang, ve Zhien Zhang. 2023. “Exergoeconomic, exergoenvironmental analysis and multi-objective optimization of a novel combined cooling, heating and power system for liquefied natural gas cold energy recovery”. *Energy* 269. doi:10.1016/j.energy.2023.126752.
- Ghaebi, Hadi, Amin Shekari Namin, ve Hadi Rostamzadeh. 2018. “Exergoeconomic optimization of a novel cascade Kalina/Kalina cycle using geothermal heat source and LNG cold energy recovery”. *Journal of Cleaner Production* 189:279-96. doi:10.1016/j.jclepro.2018.04.049.
- Ghaebi, Hadi, Towhid Parikhani, ve Hadi Rostamzadeh. 2018. “A novel trigeneration system using geothermal heat source and liquefied natural gas cold energy recovery: Energy, exergy and exergoeconomic analysis”. *Renewable Energy* 119:513-27. doi:10.1016/j.renene.2017.11.082.
- Ghorbani, Bahram, Armin Ebrahimi, Mostafa Moradi, ve Masoud Ziabasharhagh. 2020. “Energy, exergy and sensitivity analyses of a novel hybrid structure for generation of Bio-Liquefied natural Gas, desalinated water and power using solar photovoltaic

- and geothermal source". *Energy Conversion and Management* 222. doi:10.1016/j.enconman.2020.113215.
- Guo, Luna, Wei Ji, Baolin An, Jianying Hu, Zhaozhao Gao, Xiaoyu Fan, ve Junjie Wang. 2021. "Thermodynamic Analysis of a Peak Shaving Power Station based on the Liquid Air Energy Storage System with the Utilization of Liquefied Natural Gas in the Liquefied Natural Gas Terminal". *Energy Technology* 9(2). doi:10.1002/ente.202000932.
- Habibi, Hamed, Ata Chitsaz, Koroush Javaherdeh, Mohammad Zoghi, ve Mojtaba Ayazpour. 2018. "Thermo-economic analysis and optimization of a solar-driven ammonia-water regenerative Rankine cycle and LNG cold energy". *Energy* 149:147-60. doi:10.1016/j.energy.2018.01.157.
- Habibollahzade, A., K. J. Petersen, M. Aliahmadi, I. Fakhari, ve J. R. Brinkerhoff. 2022. "Comparative thermoeconomic analysis of geothermal energy recovery via super/transcritical CO₂ and subcritical organic Rankine cycles". *Energy Conversion and Management* 251. doi:10.1016/j.enconman.2021.115008.
- Hai, Tao, Mohammad Zoghi, Hooman Abed, Bhupendra Singh Chauhan, ve Ahmed Najat Ahmed. 2023. "Exergy-economic study and multi-objective optimization of a geothermal-based combined organic flash cycle and PEMFC for poly-generation purpose". *Energy* 268. doi:10.1016/j.energy.2023.126607.
- Hassani Mokarram, N., ve A. H. Mosaffa. 2020. "Investigation of the thermoeconomic improvement of integrating enhanced geothermal single flash with transcritical organic Rankine cycle". *Energy Conversion and Management* 213. doi:10.1016/j.enconman.2020.112831.
- Hu, Tinglong, Yesai Li, Jiajie Wang, ve Yi Fan. t.y. "Academic Journal of Science and Technology Thermodynamic and Economic Analysis of a High-efficiency System Integrating ORC Power Generation, CO₂ Capture, and CO₂ Storage Driven by Complementary LNG Cold Energy and Flue Gas Waste Heat".
- Jovijari, Fakhroddin ;, Abbas Kosarineia, + ; Mehrpooya, ve Mehdi • . ; Nabhani. t.y. *Exergy, Exergoeconomic, and Exergoenvironmental Analysis in Natural Gas Liquid Recovery Process*. C. 42.
- Kanbur, Baris Burak, Liming Xiang, Swapnil Dubey, Fook Hoong Choo, ve Fei Duan. 2017. "Cold utilization systems of LNG: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79:1171-88.
- Khanmohammadi, Shoaib, Farayi Musharavati, ve Muhammad Sajid Khan. 2023. "Proposal a new hybrid system comprising of LNG regasification and geothermal sources: Exergy, exergo-economic, and optimization". *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 60. doi:10.1016/j.seta.2023.103525.
- Khoshgoftar Manesh, M. H., P. Navid, A. M. Blanco Marigorta, M. Amidpour, ve M. H. Hamedi. 2013. "New procedure for optimal design and evaluation of cogeneration system based on advanced exergoeconomic and exergoenvironmental analyses". *Energy* 59:314-33. doi:10.1016/j.energy.2013.06.017.
- Kwak, Ho Young, Cuneyt Uysal, Dilek Nur Ozen, ve Huseyin Kurt. 2020. "A comparative assessment of SPECO and MOPSA on costing of exergy destruction". *International Journal of Exergy* 32(1):62. doi:10.1504/ijex.2020.10029796.
- Lee, Ung, ve Chonghun Han. 2015. "Simulation and optimization of multi-component organic Rankine cycle integrated with post-combustion capture process". *Computers and Chemical Engineering* 83:21-34. doi:10.1016/j.compchemeng.2015.03.021.
- Li, Biao, Heping Xie, Licheng Sun, Tianyi Gao, Entong Xia, Bowen Liu, Jun Wang, ve Xiting Long. 2025. "Advanced exergy analysis and multi-objective optimization of

- dual-loop ORC utilizing LNG cold energy and geothermal energy”. *Renewable Energy* 239. doi:10.1016/j.renene.2024.122164.
- Lin, Yaoting, Wei Zhou, Sohaib Tahir Chauhdary, ve Wenshuai Zuo. 2025. “4E assessment of a geothermal-driven combined power and cooling system coupled with a liquefied natural gas cold energy recovery unit”. *Renewable Energy* 240. doi:10.1016/j.renene.2024.122165.
- Liu, Jingyuan, Tian Zhou, ve Sheng Yang. 2024. “Advanced exergy and exergoeconomic analysis of a multi-stage Rankine cycle system combined with hydrate energy storage recovering LNG cold energy”. *Energy* 288. doi:10.1016/j.energy.2023.129810.
- Liu, Zhan, Zihui Liu, Xing Cao, Tao Luo, ve Xiaohu Yang. 2020. “Advanced exergoeconomic evaluation on supercritical carbon dioxide recompression Brayton cycle”. *Journal of Cleaner Production* 256. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120537.
- Mardan Dezfouli, Amir Hossein, Saba Arshizadeh, Mohammad Nikjah Bakhshayesh, Ali Jahangiri, ve Sahar Ahrari. 2024. “The 4E emergy-based analysis of a novel multi-generation geothermal cycle using LNG cold energy recovery”. *Renewable Energy* 223. doi:10.1016/j.renene.2024.120084.
- Mehdikhani, Vahid, Iraj Mirzaee, Morteza Khalilian, ve Mehran Abdolalipouradl. 2022. “Thermodynamic and exergoeconomic assessment of a new combined power, natural gas, and hydrogen system based on two geothermal wells”. *Applied Thermal Engineering* 206. doi:10.1016/j.applthermaleng.2022.118116.
- Mehrenjani, Javad Rezazadeh, Amirali Shirzad, Arman Adouli, ve Ayat Gharehghani. 2024. “Data-driven optimization of two novel geothermal-powered systems integrating LNG regasification with thermoelectric generation for eco-friendly seawater desalination and data center cooling”. *Energy* 313. doi:10.1016/j.energy.2024.133846.
- Mohammadi, Zahra, ve Mohsen Fallah. 2023. “Conventional and advanced exergy investigation of a double flash cycle integrated by absorption cooling, ORC, and TEG power system driven by geothermal energy”. *Energy* 282. doi:10.1016/j.energy.2023.128372.
- Mondal, Subha, ve Sudipta De. 2024. “Self-superheated combined flash binary geothermal cycle using transcritical-CO₂ power cycle with LNG heat sink as the secondary cycle”. *Energy* 313. doi:10.1016/j.energy.2024.133742.
- Mosaffa, A. H., N. Hasani Mokarram, ve L. Garousi Farshi. 2017. “Thermo-economic analysis of combined different ORCs geothermal power plants and LNG cold energy”. *Geothermics* 65:113-25. doi:10.1016/j.geothermics.2016.09.004.
- Muhammad, Hafiz Ali, Beomjoon Lee, Junhyun Cho, Zabdur Rehman, Bongsu Choi, Jongjae Cho, Chulwoo Roh, Gilbong Lee, Muhammad Imran, ve Young Jin Baik. 2021. “Application of advanced exergy analysis for optimizing the design of carbon dioxide pressurization system”. *Energy* 228. doi:10.1016/j.energy.2021.120580.
- Nami, Hossein, Arash Nemati, ve Farshad Jabbari Fard. 2017. “Conventional and advanced exergy analyses of a geothermal driven dual fluid organic Rankine cycle (ORC)”. *Applied Thermal Engineering* 122:59-70. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.05.011.
- Ozen, Dilek Nur, ve İbrahim Uçar. 2020. “Energy, exergy, and exergo-economic analysis of a novel combined power system using the cold energy of liquified natural gas (LNG)”. *Environmental Progress and Sustainable Energy* 39(4). doi:10.1002/ep.13377.

- Özen, Dilek Nur. 2024. "Advanced exergo-economic and exergo-environmental analyses of a geothermal sourced power system with the modified productive structure analysis method (MOPSA)". *Renewable Energy* 237. doi:10.1016/j.renene.2024.121715.
- Özen, Dilek Nur, Esra Hançer Güteryüz, ve Ayşe Merve Acılar. 2024. "Advanced exergo-economic analysis of an advanced adiabatic compressed air energy storage system with the modified productive structure analysis method and multi-objective optimization study". *Journal of Energy Storage* 81. doi:10.1016/j.est.2023.110380.
- Özen, Dilek Nur, ve Betül Koçak. 2022. "Advanced exergy and exergo-economic analyses of a novel combined power system using the cold energy of liquefied natural gas". *Energy* 248. doi:10.1016/j.energy.2022.123531.
- Pan, Jie, Qinghan Cao, Jie Zhang, Mofan Li, Linghong Tang, ve Ran Li. 2024. "Design and optimization of a combined supercritical CO₂ recompression Brayton/Kalina cycle by using solar energy and LNG cold energy". *Applied Thermal Engineering* 247. doi:10.1016/j.applthermaleng.2024.123106.
- Pan, Jie, Mofan Li, Min Zhu, Ran Li, Linghong Tang, ve Junhua Bai. 2023. "Energy, exergy and economic analysis of different integrated systems for power generation using LNG cold energy and geothermal energy". *Renewable Energy* 202:1054-70. doi:10.1016/j.renene.2022.12.021.
- Parikhani, Towhid, Towhid Gholizadeh, Hadi Ghaebi, Seyed Mohammad Sattari Sadat, ve Mehrdad Sarabi. 2019a. "Exergoeconomic optimization of a novel multigeneration system driven by geothermal heat source and liquefied natural gas cold energy recovery". *Journal of Cleaner Production* 209:550-71. doi:10.1016/j.jclepro.2018.09.181.
- Parikhani, Towhid, Towhid Gholizadeh, Hadi Ghaebi, Seyed Mohammad Sattari Sadat, ve Mehrdad Sarabi. 2019b. "Exergoeconomic optimization of a novel multigeneration system driven by geothermal heat source and liquefied natural gas cold energy recovery". *Journal of Cleaner Production* 209:550-71. doi:10.1016/j.jclepro.2018.09.181.
- Ren, Jie, Zuoqin Qian, Chunguang Fei, Ding Lu, Yincai Zou, Chen Xu, ve Lu Liu. 2023. "Thermodynamic, exergoeconomic, and exergoenvironmental analysis of a combined cooling and power system for natural gas-biomass dual fuel gas turbine waste heat recovery". *Energy* 269. doi:10.1016/j.energy.2023.126676.
- Ruiz-Casanova, Eduardo, Carlos Rubio-Maya, Víctor M. Ambriz-Díaz, ve A. Gutiérrez Martínez. 2024. "Energy, exergy and exergoeconomic analyses and ANN-based three-objective optimization of a supercritical CO₂ recompression Brayton cycle driven by a high-temperature geothermal reservoir". *Energy* 311. doi:10.1016/j.energy.2024.133381.
- S. Sadaghiani, Mirhadi, M. H. Ahmadi, Mehdi Mehrpooya, F. Pourfayaz, ve Michel Feidt. 2018. "Process development and thermodynamic analysis of a novel power generation plant driven by geothermal energy with liquefied natural gas as its heat sink". *Applied Thermal Engineering* 133:645-58. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.01.077.
- Sun, Jingtao, Gongxing Yan, Azher M. Abed, Aman Sharma, R. Gangadevi, Sayed M. Eldin, ve Mohammad Taghavi. 2022. "Evaluation and optimization of a new energy cycle based on geothermal wells, liquefied natural gas and solar thermal energy". *Process Safety and Environmental Protection* 168:544-57. doi:10.1016/j.psep.2022.10.029.

- Tsatsaronis, G., A. Boyano, ve A. M. Blanco-Marigorta. 2010a. *IMECE2010-38551 ADVANCED EXERGOENVIRONMENTAL ANALYSIS OF A STEAM METHANE REFORMING SYSTEM FOR HYDROGEN PRODUCTION*.
- Tsatsaronis, G., A. Boyano, ve A. M. Blanco-Marigorta. 2010b. *IMECE2010-38551 ADVANCED EXERGOENVIRONMENTAL ANALYSIS OF A STEAM METHANE REFORMING SYSTEM FOR HYDROGEN PRODUCTION*.
- Tsatsaronis, G., ve T. Morosuk. 2009. "A general exergy-based method for combining a cost analysis with an environmental impact analysis. Part I - Theoretical development". Ss. 453-62 içinde *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings*. C. 8. American Society of Mechanical Engineers (ASME).
- Verma, Shanu, Millie Pant, ve Vaclav Snasel. 2021. "A Comprehensive Review on NSGA-II for Multi-Objective Combinatorial Optimization Problems". *IEEE Access* 9:57757-91. doi:10.1109/ACCESS.2021.3070634.
- Wang, Haicui, Zhimin Ma, Jing Bian, ve Mahdi Pourtadayyon. 2024. "Development and multi-aspect investigation of an innovative process driven by geothermal energy, involving LNG-based steam reforming and syngas-fueled gas turbine for production of power, heat, and methanol". *Energy* 311. doi:10.1016/j.energy.2024.133324.
- Wang, Huan, Xiaojun Shi, ve Defu Che. 2013. "Thermodynamic optimization of the operating parameters for a combined power cycle utilizing low-temperature waste heat and LNG cold energy". *Applied Thermal Engineering* 59(1-2):490-97. doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.05.048.
- Wang, Jiangfeng, Jianyong Wang, Yiping Dai, ve Pan Zhao. 2014. "Thermodynamic analysis and optimization of a transcritical CO₂ geothermal power generation system based on the cold energy utilization of LNG". *Applied Thermal Engineering* 70(1):531-40. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.05.084.
- Wang, Jianyong, Jiangfeng Wang, Yiping Dai, ve Pan Zhao. 2015. "Thermodynamic analysis and optimization of a flash-binary geothermal power generation system". *Geothermics* 55:69-77. doi:10.1016/j.geothermics.2015.01.012.
- Wang, Qingqiang, Jili Hou, Xing Wei, Nan Jin, Yue Ma, Shuyuan Li, ve Yuchao Zhao. 2022. "Advanced exergoenvironmental analysis of the oil shale retorting process with SJ-type rectangular retort". *Energy* 260. doi:10.1016/j.energy.2022.124929.
- Wang, Wenge, Jiangfeng Wang, Zhijian Lu, ve Sheng Wang. 2020. "Exergoeconomic and exergoenvironmental analysis of a combined heating and power system driven by geothermal source". *Energy Conversion and Management* 211. doi:10.1016/j.enconman.2020.112765.
- Xie, Yi, ve Xinliang Zheng. 2025. "Techno-economic optimization of a geothermal multi-product layout composed of a CO₂ trans-critical Rankine-LNG system integrated with ejector cooling system and HDH desalination unit". *Desalination* 593. doi:10.1016/j.desal.2024.118180.
- You, Jing, Rui Xiao, Majed A. Alotaibi, Sohaib Tahir Chauhdary, ve Tiancheng Ji. 2025. "Integrating an innovative geothermal-driven multigeneration approach and LNG cold energy utilization process for sustainable energy supply, producing hydrogen, power, heating, and cooling". *Process Safety and Environmental Protection* 196. doi:10.1016/j.psep.2025.106904.
- Yousef, Mohamed S., A. A. Hawwash, ve Domingo Santana. 2024. "Assessment of a sustainable multigeneration system integrating supercritical CO₂ Brayton cycle and LNG regasification: Thermodynamic and exergoeconomic evaluation". *Case Studies in Thermal Engineering* 56. doi:10.1016/j.csite.2024.104205.

- Zhang, Lei, Sayed Fayaz Ahmad, Zhenti Cui, Muna Al Razgan, Emad Marous Awwad, Ahmad Y. A. Bani Ahmad Ayassrah, ve Kwanho Shi. 2024. "Energy, exergy, hermoeconomic analysis of a novel multi-generation system based on geothermal, kalina, double effect absorption chiller, and LNG regasification". *Desalination* 586. doi:10.1016/j.desal.2024.117830.
- Zhao, Liang, Jiulei Zhang, Xiu Wang, Junsheng Feng, Hui Dong, ve Xiangwei Kong. 2020. "Dynamic exergy analysis of a novel LNG cold energy utilization system combined with cold, heat and power". *Energy* 212. doi:10.1016/j.energy.2020.118649.

