



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



LNG'NİN SOĞUK ENERJİSİNİ KULLANAN
YENİ BİR BİRLEŞİK GÜÇ SİSTEMİNİN
EKSERJİ VE EKSERGO-EKONOMİK
ANALİZİ

BETÜL KOÇAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

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.

Betül KOÇAK

Tarih: 06.01.2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LNG'NİN SOĞUK ENERJİSİNİ KULLANAN YENİ BİR BİRLEŞİK GÜÇ SİSTEMİNİN EKSERJİ VE EKSERGO-EKONOMİK ANALİZİ

Betül KOÇAK

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN

2022, 51 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN

Prof. Dr. Ali KAHRAMAN

Dr. Öğr. Üyesi Nagihan BİLİR SAĞ

Bu çalışmada LNG'nin soğuk enerjisini kullanan yeni bir birleşik güç sistemi tasarlanmıştır. Sistemin geleneksel ve ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizleri yapılmıştır. Literatürde yapılan araştırmaya göre ilk defa LNG'nin soğuk enerjisini kullanan bir birleşik güç sistemine MOPSA metodu ile ileri eksergo-ekonomik analiz uygulanmıştır. Birleşik sistemin ekserji yıkımının ve ekserji yıkım maliyetinin % 23'ü kaçınılmaz bölüme oluşturmaktadır. Hem geleneksel hem de ileri ekserji analizinde en yüksek ekserji yıkım ve maliyeti parabolik güneş kolektöründe çıkmıştır. Ayrıca analizler sonucunda birleşik sistemin performansını iyileştirme potansiyeline sahip en etkili başlıca sistem bileşenlerinin sırası ile parabolik güneş kolektörü, türbin-3 ve türbin-2 olduğu görülmüştür. Çalışma, amaçlanan birleşik güç sisteminin performansının iyileştirme potansiyelinin olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: İleri ekserji analizi, ileri eksergo-ekonomik analiz, LNG, MOPSA metodu, Organik Rankine Çevrimi, soğuk enerji, yeniden gazlaştırma

ABSTRACT

MS THESIS

EXERGY AND EXERGO-ECONOMIC ANALYSIS OF A NEW COMBINED POWER SYSTEMS USING LNG'S COLD ENERGY

Betül KOÇAK

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Assoc.Prof.Dr. Dilek Nur ÖZEN

2022, 51 Pages

Jury

Assoc.Prof.Dr. Dilek Nur ÖZEN

Prof.Dr. Ali KAHRAMAN

Asst.Prof.Dr. Nagihan BİLİR SAĞ

In this study, a new combined power system using the cold energy of LNG was designed. Conventional and advanced exergy and exergo-economic analyses of the system were performed. According to research conducted in the literature, advanced exergo-economic analysis was applied by MOPSA method to a combined power system using the cold energy of LNG for the first time. 23% of the exergy destruction and exergy destruction cost of the combined system constitute the avoidable part. In both conventional and advanced exergy analysis, the highest exergy destruction and cost were found in the parabolic solar collector. In addition, as a result of the analyses that the most effective main system components that have the potential to improve the performance of the combined system are the parabolic solar collector, turbine-3 and turbine-2, respectively. The study revealed that there is potential to improve the performance of the intended combined power system.

Keywords: Advanced exergy analysis, advanced exergo-economic analysis, cold energy, LNG, MOPSA method, Organic Rankine Cycle, regasification

ÖNSÖZ

Çalışmam boyunca bilgisinden, tecrübesinden yararlandığım ve benden desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Hayatım boyunca her anımda yanımda olan desteklerini asla eksik etmeyen kıymetli aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Betül KOÇAK
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

| | |
|---------------------------------------------------------------------|------------|
| ÖZET | iii |
| ABSTRACT..... | iv |
| ÖNSÖZ | v |
| İÇİNDEKİLER..... | vi |
| SİMGELER VE KISALTMALAR..... | vii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | ix |
| TABLolar DİZİNİ..... | x |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI..... | 4 |
| 2.1. LNG'nin Soğuk Enerjisini Kullanan Birleşik Güç Sistemleri..... | 4 |
| 2.2. İleri Ekserji ve Eksergo-ekonomik Analiz..... | 13 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM..... | 16 |
| 3.1. Sistemin Matematik Modeli ve Kabuller..... | 17 |
| 3.2. Enerji ve Geleneksel Ekserji Analizi..... | 18 |
| 3.3. Geleneksel Eksergo-ekonomik Analiz..... | 23 |
| 3.3.1. MOPSA Metodu..... | 23 |
| 3.4. İleri Ekserji Analizi..... | 27 |
| 3.5. İleri Eksergo-ekonomik Analiz..... | 29 |
| 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA..... | 31 |
| 4.1. Model Doğrulama..... | 43 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 45 |
| 5.1. Sonuçlar..... | 45 |
| 5.2. Öneriler..... | 45 |
| 6. KAYNAKLAR..... | 46 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

| | | |
|------------------|---|--------------------------------------------------------|
| A | : | Isı transfer alanı (m^2) |
| c | : | Birim ekserji maliyeti (\$/GJ) |
| $c_{f,k}$ | : | k bileşeninin birim yakıt ekserji maliyeti (\$/GJ) |
| $c_{p,k}$ | : | k bileşeninin birim ürün ekserji maliyeti (\$/GJ) |
| \dot{C} | : | Maliyet akış hızı (\$/h) |
| CRF | : | Kapital geri kazanma faktörü |
| $\dot{E}x$ | : | Ekserji hızı (kW) |
| $\dot{E}x_{gir}$ | : | Giren ekserji hızı (kW) |
| $\dot{E}x_{F,k}$ | : | k bileşeninin yakıt ekserji hızı (kW) |
| $\dot{E}x_{P,k}$ | : | k bileşeninin ürün ekserji hızı (kW) |
| f_k | : | k bileşeninin eksergo-ekonomik faktörü (%) |
| G | : | Güneş ışınım yoğunluğu (W/m^2) |
| h | : | Özgül entalpi (kJ/kg) |
| \dot{m} | : | Kütle akış hızı (kg/s) |
| P_R | : | Basınç oranı |
| r_k | : | k bileşeninin göreceli maliyet farkı (%) |
| \dot{Q} | : | Isı transfer hızı (kW) |
| s | : | Özgül entropi (kJ/kmol.K) |
| T | : | Sıcaklık (K) |
| \dot{W} | : | Bileşenler tarafından üretilen veya tüketilen güç (kW) |
| $Y_{D,k}^*$ | : | Ekserji yıkım oranı (%) |
| \dot{Z}_k | : | k bileşeninin sermaye maliyet oranı (\$/s) |

Üst Simgeler

| | | |
|-------|---|----------------------|
| AV | : | Kaçınılabilir |
| adv | : | İleri |
| CH | : | Kimyasal |
| EN | : | İçsel |
| EN,AV | : | İçsel kaçınılabilir |
| EN,UN | : | İçsel kaçınılamaz |
| EX | : | Dışsal |
| EX,AV | : | Dışsal kaçınılabilir |
| EX,UN | : | Dışsal kaçınılamaz |
| KN | : | Kinetik |
| M | : | Mekanik |
| PT | : | Potansiyel |
| T | : | Termal |
| TM | : | Termomekanik |
| UN | : | Kaçınılamaz |
| * | : | Değiştirilmiş |

Alt Simgeler

| | | |
|-----|---|---------------------------|
| 0 | : | Ölü hâl |
| a | : | Açıklık uzunluğu |
| c | : | Kolektör |
| D | : | Yıkım |
| ID | : | Isı değiştiricisi |
| gir | : | Giriş |
| ORÇ | : | Organik Rankine Çevrimi |
| P | : | Pompa |
| PGK | : | Parabolik güneş kolektörü |
| ds | : | Deniz suyu |
| st | : | Aşırı kızdırma sıcaklığı |
| T | : | Türbin |

Yunan Harfleri

| | | |
|---------------------|---|--------------------------------|
| η_{sistem} | : | Sistemin enerji verimi (%) |
| η_P | : | Pompanın izantropik verimi (%) |
| η_T | : | Türbinin izantropik verimi (%) |
| ϵ_{sistem} | : | Sistemin ekserji verimi (%) |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.1. Amaçlanan sistemin gerçek, kaçınılmaz ve ideal koşullarda enerji ve ekserji verimleri..... | 32 |
| Şekil 4.2. Sistem bileşenleri için ekserji yıkım yüzdelik değerleri | 34 |
| Şekil 4.3. Sistem bileşenlerinin ekserji ve değiştirilmiş ekserji yıkım oranları | 35 |
| Şekil 4.4. Sistem bileşenleri için ekserji yıkım maliyetlerinin yüzdelik değerleri | 36 |
| Şekil 4.5. Sistem bileşenleri için yatırım maliyet akışlarının yüzdelik değerleri | 38 |
| Şekil 4.6. Birleşik güç sisteminin ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analiz sonuçları .. | 39 |
| Şekil 4.7. Sistem bileşenlerinin geleneksel ve ileri ekserji analizine göre ekserji verimleri..... | 42 |
| Şekil 4.8. Sistem bileşenlerinin geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analizine göre eksergo-ekonomik faktörleri..... | 43 |

TABLULAR DİZİNİ

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 3.1. Amaçlanan sistemin simülasyon koşulları..... | 18 |
| Tablo 3.2. Sistemi oluşturan elemanların Zk değerleri..... | 24 |
| Tablo 3.3. İleri ekserji analizi için girdi değerleri (Boyaghchi ve Sabaghian, 2016), (Nami ve ark., 2017b), (Oyekale ve ark., 2020) | 28 |
| Tablo 4.1. Amaçlanan sistemin proses termodinamik verisi | 31 |
| Tablo 4.2. Sistem bileşenlerinin ileri ekserji analiz sonuçları | 33 |
| Tablo 4.2. Sistem bileşenlerinin ileri ekserji analiz sonuçları (Devam) | 33 |
| Tablo 4.3. Sistem bileşenlerinde ekserji yıkım maliyet değerleri..... | 35 |
| Tablo 4.4. MOPSA metodu için tanımlanan birim maliyet değerleri | 36 |
| Tablo 4.5. Amaçlanan birleşik güç sisteminin bileşenleri için ekserji türlerinin maliyet akışları..... | 37 |
| Tablo 4.6. Sistem bileşenlerine ait ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçları..... | 38 |
| Tablo 4.7. Sistem bileşenlerinin geleneksel ekserji ve eksergo-ekonomik analiz sonuçları..... | 40 |
| Tablo 4.8. Sistem bileşenleri için geleneksel ve ileri ekserji analiz ve eksergo-ekonomik analiz sonuçları | 40 |
| Tablo 4.8. Sistem bileşenleri için geleneksel ve ileri ekserji analiz ve eksergo-ekonomik analiz sonuçları (Devam) | 41 |
| Tablo 4.9. Bu çalışmadaki model ile referans çalışmanın PSG için karşılaştırılması.... | 44 |
| Tablo 4.10. Bu çalışmadaki model ile Rankine tipi çevrim (RTÇ) ve Doğrudan Genişleme çevrimi (DGÇ) için referans çalışmanın karşılaştırılması | 44 |

1. GİRİŞ

Dünyada meydana gelen enerji kesintileri, enerji tedarikindeki yetersizlikler gibi enerji ile ilgili sorunların yönetimi konusunda çözümler aranmıştır. Buna ek olarak, enerji üretiminden kaynaklı emisyonların çevre kirliliğine sebep olması da bu sorunların peşinden gelmektedir. Bu bağlamda birçok çalışma yapılmıştır. Aynı zamanda, üretilen enerjinin tasarrufu ve etkin kullanımı, bu konudaki çalışmaların devamını getirmektedir. Bunun sonucunda belirli endüstriyel işlemler için gerekli ısı ihtiyacını karşılarken, aynı zamanda elektrik de üreten santraller geliştirilmiştir. Bu santrallere birleşik ısı-güç santralleri (kojenerasyon) denir. Sadece elektrik ve ısıtma sağlamanın yanı sıra proseslerin ve ortamların soğutulmasında da kullanılmak üzere birleşik soğutma, ısıtma ve güç sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemlere de trijenerasyon denir. Enerjinin en verimli haliyle üretilmesi ve çevrenin korunması önemli bir konu olduğundan tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de bu sistemlere olan ilgi artmaktadır. Fosil yakıt kaynaklarındaki önemli düşüş ve atmosferdeki karbondioksit emisyonlarındaki önemli artış nedeniyle yenilenebilir enerjiye olan ilgi artmıştır. Özellikle atık ısıyı geri kazanmak için yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan güç sistemleri önem arz etmektedir. Enerji kaynakları ile tüketim oranları arasındaki bağıntı nedeniyle doğal gaz kaynaklarına ve gazdan sıvı yakıt dönüşüm işlemlerine büyük önem verilmektedir. Son yıllarda, LNG alım terminallerinde güç üretimi ile ilgili çalışmalara yoğunlaşmıştır. Literatürde, LNG'nin soğuk enerjisini kullanan birleşik güç sistemleriyle ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

Yer kabuğunun içinde bulunan fosil yakıtlar grubuna dâhil olan doğal gaz, hidrokarbon esaslı bir yakıttır. Bir petrol türevidir ve yakıt sıralamasında petrolden sonra önem arz eder. Yüksek ısı değerine sahip olup verimli bir yakıttır. Havadan hafif, kokusuz, renksiz, korozif özelliği olmayan ve zehirsiz gaz olma özelliği doğal gazın avantajlarından. Bileşiminde büyük oranda (%70-90) metan gazı (CH_4) bulunur. Metan gazının yanı sıra etan (C_2H_6), propan (C_3H_8), bütan (C_4H_{10}) gibi diğer hidrokarbon bileşikleri de içerir. Eser miktarda karbondioksit (CO_2), oksijen (O), azot (N_2), helyum (He) gazlarına da sahiptir.

Doğal gaz, en yaygın kullanılan geleneksel mineral enerji kaynaklarından biridir. Kömür ve benzin gibi diğer maden kaynaklarının aksine, doğal gaz daha yüksek yanma ısısına sahiptir ve çok daha az kirlilik üretir. Dezavantajı, ortam sıcaklığı ve basıncı altında gaz halinde olmasıdır, bu nedenle genellikle uzun mesafeli nakliye ve depolama

için LNG'ye sıvılaştırılması gerekir. (Liu ve You, 1999) Doğal gazın, enerjiye ihtiyaç duyulan bölgelere uzakta olması alternatif birtakım çözümler üretmiştir. Doğal gazı sıvılaştırıp depolamak bu çözüm yöntemlerinden biridir. LNG (sıvılaştırılmış doğal gaz), doğal gazın, atmosfer basıncında -162°C 'ye kadar soğutulup sıvı faza geçmesiyle elde edilir. Bu sayede taşıma ve depolama kolaylığı sağlanmış olunur. LNG ülkemize yurt dışından özel gemiler aracılığıyla ithal edilir. Sıcaklığının yükselmemesi için özel tanklarda depolanır ve taşınır. LNG'nin hacmi, doğal gaza oranla 600 kat küçüktür. LNG'nin yakıt olarak kullanılabilmesi için tekrar gaz haline getirilmesi gerekir. Bu işlemle (yeniden gazlaştırma) önemli bir soğutma enerjisi oluşur.

Boru hatları, en basit ve en ucuz gaz taşıma yöntemi olarak kabul edilir. Boru hattı teknolojisindeki ilerlemeler ve boru hatlarının uzun mesafelerde denizde ve karada sıvı taşımacılığı için kullanılmasındaki artışa rağmen, bu taşıma yöntemi oldukça pahalıdır. Gaz boru hattı ile karada 3000 km'den fazla ve denizde 1000 km'den fazla mesafelere ve uzak bölgelere taşınması genellikle mümkün değildir. Atmosferik basınçta doğal gaz yoğunlaştırılarak hacmi 600 kat azaltılabilmektedir. Bu nedenle sıvı doğal gaz, küresel tüketici pazarlarına ve uzak bölgelere gaz transferi için uygun bir çözüm olmuştur. (Ghorbani ve ark., 2020c)

Ülkemiz, LNG ithal eden ülkeler arasındadır. Arz kaynaklarının çeşitlendirilerek arz güvenliğinin ve tedarikte esnekliğin artırılması amacıyla 1994 yılından itibaren Cezayir'den, 1999 yılından itibaren Nijerya'dan LNG alımına başlanmıştır. (Uluslararası Afro-Avrasya Araştırmaları Dergisi/Türkiye'nin Doğal Gaz Bağımlılığı ve Alternatif Enerji Kaynakları Üretimine Gerekliliği). 2006 yılında Rusya ve Ukrayna arasında yaşanan doğal gaz krizi sonrasında Batı Hattından gelen doğal gazın azalması, İran'ın teknik sorunlar ve iç tüketimini karşılayamadığı gerekçeleriyle ihraç ettiği doğal gazı kış aylarında kesmesi, yeterli depolama kapasitesine sahip olmayan Türkiye'nin boru hatlarından gelen doğal gazda arz sıkıntısı yaşamasına neden olmuştur. Tedarikçi ve transit ülkelerden kaynaklanan nedenler ve teknik nedenlerle özellikle kış aylarında günlük gaz sözleşme değerlerinin altında doğal gaz arzının gerçekleştiği ve dolayısıyla günlük arz-talep dengesinin sağlanmasında sıkıntıların yaşandığı durumlarla karşı karşıya kalınmıştır. Bu sorunların önüne geçmek için LNG ithalatı yapılmaktadır. Türkiye, ihtiyacı olan doğal gazın küçük bir kısmını kendisi üretmektedir fakat geri kalan doğal gazı ithal etmektedir. 2018 yılında, doğal gaz ithalatı %46,95'lik payla en fazla Rusya'dan yapılmıştır. LNG ithalatı ise toplam ithalatın %22,49'unu oluşturur. (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu Doğal Gaz Piyasası 2019 Yılı Sektör Raporu)

Mevcut Politikalar Senaryosu, dünyanın herhangi bir değişiklik olmaksızın mevcut yolunda devam etmesi durumunda ne olacağını göstermektedir. Bu senaryoda, enerji talebi her yıl 2040'a kadar % 1,3 oranında artarken, verimliliği artırmak için daha fazla çaba sarf edilerek enerji hizmetlerine olan talep artmaktadır. Güneş fotovoltaiiklerinin (PV) önderlik ettiği düşük karbonlu kaynaklar, bu büyümenin yarısından fazlasını sağlamakta ve sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) ticaretinin artmasıyla desteklenen doğal gaz, bir diğer üçte birini oluşturmaktadır. Doğal gaza olan talep, endüstri ve (Çin'de) konut tüketicileri için hızla artmakta ve yeni LNG tedariki ve boru hattı bağlantılarına dünya çapında bir yatırım dalgasını tetiklemektedir. (World Energy Outlook 2019 (IEA, 2019))

Bir ton LNG üretmek için yaklaşık 850 kWh elektrik enerjisi tüketilir. Alıcı bölgede normal kullanım için tekrar gazlaştırılmalıdır ve bu işlem de enerji tüketir. LNG'nin soğuk ısıyı kullanılırsa genel verimliliğin artacağı açıkça görülmektedir. Enerji üretimi için soğuk ısı kullanıldığında, bir ton LNG'nin yaklaşık 240 kWh elektrik enerjisi üreteceği tahmin edilmektedir. Bu durumda LNG'nin soğuk ısıyı kullanılarak elektrik üretimi potansiyeli çok önemlidir ve pratik uygulamalarda araştırılmalıdır. (Liu ve You, 1999)

Tüm dünyada, artan LNG talepleriyle birlikte LNG'nin içerdiği soğuk enerji ve basınç enerjisinin kullanımı büyük önem taşımaktadır. LNG'nin soğuk enerjisi; elektrik üretimi, kriyojenik hava ayırma, deniz suyunu tuzdan arındırma, soğuk enerji depolama, soğutma, sıvı CO₂ yakalama, kuru buz üretimi, hafif hidrokarbon ayırma gibi soğuk enerji gerektiren tüm proseslere uygulanabilir (Yu ve ark., 2018).

Bu çalışmada ısı kaynağı olarak kullanılan, son yıllarda büyük ilgi çeken ve gelişme gösteren, gelecek vaat eden bir yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisinin, elektrik üretiminin çevresel etkisinin daha da azaltılmasını sağlayabileceği düşünülmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

LNG, buharlaşmadan ve boru hattı sistemine girmeden önce enerji üretimi için kullanılacak önemli miktarda kriyojenik enerji içerir. LNG'nin soğuk enerjisini kullanarak elektrik enerjisi üretimi, önemli bir araştırma alanıdır. LNG soğuk enerjisinin kullanımını geliştirmek, verimliliğini artırmak için birçok çalışma yapılmış ve araştırmacılar tarafından birçok birleşik güç çevrimi önerilmiştir.

2.1. LNG'nin Soğuk Enerjisini Kullanan Birleşik Güç Sistemleri

Deng ve ark. (2004), yakıt kimyasal enerjisi ve sıvılaştırılmış doğal gazın kriyojenik enerjisinin kademeli kullanımına dayalı, elektrik ve soğutma gücü sağlayan yeni bir kojenerasyon güç sistemi önermişlerdir. Sistem, NG yakıt tasarrufu, CO₂ emisyonunu azaltma ve LNG kriyojenik enerjiyi etkin bir şekilde kullanma konusunda mükemmel performans sağlamıştır. Geleneksel sistemle karşılaştırıldığında, bu kojenerasyon sistemi yakıt kimyasal enerjisi ve LNG kriyojenik enerjiden sırasıyla % 7,5-12,2 ve % 13,2-14,3 oranında tasarruf sağladığı görülmüştür.

Ersoy ve Demirpolat (2009), Marmara Ereğlisi alıcı terminalinde LNG'nin buharlaştırılması sırasında açık ve birleşik Rankine çevrimleri ile güç üretimini incelemişlerdir. Kriyojenik sıcaklıkta LNG, ısı kuyusu; daha yüksek sıcaklıktaki deniz suyu ise ısı kaynağı olarak kabul edilmiştir. Terminalden alınan veriler kullanılarak terminalde üretilen güç, kullanılan güç çevrimi türüne, türbin giriş basıncına, evaporatör ve kondenser çıkış sıcaklıklarına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Türbin giriş basıncının optimum değeri, açık Rankine çevrimi için 200 bar, birleşik Rankine çevrimi için 150 bar olduğu görülmüştür. Kapalı Rankine türbin giriş basıncındaki ve evaporatör çıkış sıcaklığındaki artış, kondenser çıkış sıcaklığındaki düşüşle birlikte, birleşik çevrimin gücünü ve ısı verimini artırdığı bulunmuştur. Terminaldeki LNG pompaları için gerekli enerjinin % 90'ının sadece açık Rankine çevrimi kullanılarak sağlanabileceği kanıtlanmıştır. Birleşik Rankine çevrimi kullanılarak, terminalde kullanılan LNG pompalarının güç gereksinimlerinin karşılandığı ve ayrıca ek güç de üretilebildiği sonucuna varılmıştır.

Shi ve Che (2009), düşük sıcaklıktaki atık ısının verimli bir şekilde geri kazanıldığı ve LNG'nin soğuk enerjisinin de tam olarak kullanılabilirdiği bir birleşik güç sistemi önermiştir. Bu sistem bir amonyak-su karışımı Rankine çevrimi ve bir LNG güç

üretim çevriminden oluşur. Rankine çevriminde, düşük sıcaklıktaki atık ısı ve LNG'nin soğuk enerjisi sırasıyla ısı kaynağı ve ısı kuyusu olarak kullanılır. Düşük sıcaklıktaki atık enerji, endüstriyel proseslerin ve enerji santrallerin egzozlarından geri kazanılır. Önerilen sistemde, amonyak türbininin giriş basıncı arttıkça maksimum net elektrik veriminin elde edilebileceği ve amonyak kütle oranı arttıkça maksimum değerin arttığı bulunmuştur. Artan amonyak türbini giriş basıncı ile ekserji verimliliği de artar. LNG türbin giriş basıncı veya ısı kaynağı sıcaklığı artarken, net elektrik verimi ve ekserji verimi de artar. LNG gaz türbini çıkış basıncının artması ile net elektrik verimi düşerken ekserji verimi artmaktadır. Sonuçlar, çevrimin net elektrik veriminin ve ekserji veriminin sırasıyla % 33.28 ve % 48.87 olduğunu göstermektedir.

Yoğuşma sıcaklığı ile LNG'nin giriş ve çıkış sıcaklığı arasındaki yüksek sıcaklık farkı nedeniyle, kondenserde ekserji kaybı meydana gelir. Sistemin ekserji verimini etkileyen bu kaybı ortadan kaldırmak gerekir. Yuanwei ve ark. (2011), kondenserdeki ekserji kaybını azaltmak için, iki farklı kademeli güç çevrimi, yani enine kademeli ve boyuna kademeli güç çevrimi önermişlerdir. Önerilen sistemin performansını analiz etmek için bir T- Ω -H diyagramı yöntemini kullanmışlardır. Burada T sıcaklık, Ω enerji seviyesini ve H enerji miktarını gösterir. Çevrimde sıcak kaynak olarak deniz suyu, ısı kuyusu olarak LNG'nin soğuk enerjisi kullanılmıştır. Boyuna kademeli çevrim, enine kademeli çevrimle karşılaştırıldığında, kondenslerdeki ekserji kaybının azaldığı görülmüştür. Aynı zamanda evaporatörlerdeki ekserji kaybı da azalırsa sistemin performansı da artmış olacaktır. Dolayısıyla boyuna kademeli güç çevriminin performansı, enine kademeli güç çevriminin performansından daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Wang ve ark. (2013), düşük dereceli atık ısıyı geri kazanmak için LNG'nin ısı kuyusu olarak kullanıldığı bir amonyaklı-su güç sistemi önermişlerdir. Hem termodinamik hem de ekonomik açıdan sistem tasarımı için en iyi termodinamik parametreleri bulmak için çok amaçlı optimizasyon yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, türbin giriş basıncındaki artış, ekserji verimi, toplam ısı transfer kapasitesi ve türbin boyutu parametresi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Türbin giriş sıcaklığındaki bir artış ise, net güç çıkışı, ekserji verimi ve türbin boyutu parametresi üzerinde olumlu bir etkiye sahip ancak toplam ısı transfer kapasitesi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Xia ve ark. (2014), LNG'nin kriyojenik enerjisinin geri kazanılmasına dayanan ters ozmoz tuzdan arındırma için güneş enerjisiyle çalışan transkritik CO₂ güç çevrimi

önermişlerdir. Sistem, bir güneş kolektörü alt sistemi, bir transkritik CO₂ güç çevrimi alt sistemi, bir LNG alt sistemi ve bir ters ozmoz tuzdan arındırma alt sisteminden oluşur. LNG ve güneş kolektör alt sisteminin kayıpları, esas olarak sistemdeki ekserji kayıplarını oluşturmuştur. Kondenser sıcaklığı arttıkça sistemin günlük ekserji verimi azalmıştır. Yağın kütle akış oranı ve NG türbin giriş basıncı arttıkça, sistemin günlük ekserji verimi artmıştır. Optimizasyon sayesinde sistemin günlük % 4,90'luk ekserji verimine ulaşarak verilen koşullarda günde 2537,33 m³ tatlı su sağlayabildiği görülmüştür.

Mehrpooya ve ark. (2016b), LNG'nin soğuk enerjisini ve düşük sıcaklıklı güneş enerjisi kullanan yeni bir oksijen-yakıt güç üretim çevrimi önermiş ve analiz etmişlerdir. Sistem, subkritik Rankine benzeri bir çevrim, bir güneş kolektörü ve LNG buharlaştırıcı alt sistemlerinden oluşur. Türbin giriş sıcaklığını, LNG akış hızını ve güneş enerjisi sisteminin ana ısı özelliklerini ayarlayarak sistemin performansının geliştirilebileceği görülmüştür. Genel sistemin enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla % 60,1 ve % 61,3 olarak belirlenmiştir.

Wang ve ark. (2019), LNG'nin kriyojenik enerjisi kullanımına dayanan kademeli iç içe organik Rankine çevrimli yeni bir sistem önerdiler. Manyezit işleme endüstrisinden gelen baca gazı ısı kaynağı olarak ve LNG'nin soğuk enerjisi de ısı kuyusu olarak kullanılmıştır. Sistem performansını değerlendirmek için üretim güç kapasitesi, ekserji verimliliği, CO₂ yakalama miktarı ve soğuk enerji kullanım verimliliği kıstas olarak değerlendirilip, hesaplanmıştır. Sonuçlar, uygun karışık çalışma sıvısı seçilmesinin ve rejeneratör kurulumunun, sistem performansını önemli derecede iyileştirebileceğini göstermektedir. Ayrıca, LNG gazlaştırma basıncı arttıkça, ekserji verimi ve soğuk enerji kullanım veriminin arttığı sonucuna varılmıştır.

Li ve ark. (2020), sıvılaştırılmış doğal gazın kriyojenik enerjisini ve düşük sıcaklıkta atık ısıyı kullanan yeni bir birleşik soğutma ve güç sistemi önermişlerdir. Önerilen sistem, absorpsiyonlu soğutma/güç çevrimi (ARP) alt sistemi ve LNG soğutma/güç çevrimi (LRP) alt sistemi olmak üzere iki alt sistemden oluşmaktadır. Ekserji analizi sonucunda, sisteminin net güç üretim verimi, kapsamlı enerji kullanım oranı ve ekserji veriminin sırasıyla % 32.70, % 81.63 ve % 35.14'e ulaştığı gözlemlenmiştir.

Emadi ve ark. (2020), katı oksit yakıt hücresi sisteminden (SOFC) atık ısıyı geri kazanmak ve sıvılaştırılmış doğal gazdan (LNG) soğuk enerjiyi kullanmak için bir gaz türbinine (SOFC-GT) bağlı, çift çevrimli bir organik Rankine çevrimi (ORC) sisteminin entegre edildiği yeni bir birleşik kojenerasyon sistemi önermişlerdir. Sistemin ekserji ve

ekonomik analizi yapılmıştır. Sistem, LNG akışının soğuk enerjisini geri kazanarak 567 kW'lık bir soğutma kapasitesi gösterirken tüm SOFC-GT-ORC sisteminin ve atık ısı geri kazanım sisteminin ekserji verimliliği sırasıyla % 51.6 ve % 32.5 olduğu bulunmuştur. Önerilen sistemin ekonomik analizi, bir elektrik ünitesinin üretim maliyetinin MWh başına 33,2 \$ olduğunu, bu da ayrı SOFC-GT ve SOFC sistemlerinin seviyelendirilmiş elektrik maliyetinden sırasıyla %12,9 ve %73,9 daha düşük olduğunu göstermektedir.

Su ve ark. (2020), bir gaz türbini, süper kritik CO₂ yeniden sıkıştırma güç sistemi (SCRPC) ve sıvılaştırılmış doğal gazın (LNG) soğuk enerjisini kullanan bir transkritik CO₂ güç sistemi (TCPC) ile entegre yeni bir güç/soğutma kojenerasyon sistemi önermişlerdir. Sistemin ekserji ve ekonomik analizi yapılmıştır. Birleşik sistemin ana ekserji yıkımı, tersinmez kimyasal reaksiyondan ve ısı transferindeki büyük sıcaklık farkından kaynaklandığı görülmüş ve yanma odasının en büyük ekserji yıkımına sahip olan bileşen olduğu sonucuna varılmıştır.

Kanbur ve ark. (2017a), LNG soğuk enerjisini kullanan, bir mikro kojenerasyon sistemi önermişlerdir. Çeşitli ortam hava sıcaklıklarına göre enerjik, ekonomik ve çevresel analizler yapılmış ve sonuçlar geleneksel mikro c-nesil sistemin genel performansı ile karşılaştırılmıştır. Üretilen elektrik oranı ve ısıl verim, incelenen her iki çevrim için aynı bulunmuştur. Bununla birlikte, önerilen sistemin geri ödeme süresi, geleneksel çevrimden yaklaşık % 6 daha yüksek çıkmıştır. Ortam hava sıcaklığının artmasıyla da çevresel geri ödeme süreleri artmıştır. Sisteminin genel verimini artırmak ve uygun noktaları görmek için LNG soğuk enerji kullanım sistemine, ekserji analizi uygulanması gerektiğine karar vermişlerdir. Ekserji analizi sonucunda geleneksel mikro kojenerasyon sisteminin, LNG'nin soğuk enerjisini kullanan mikro kojenerasyon sistemine göre (LNG soğuk enerjisi kullanılan sistemdeki LNG buharlaştırıcıda mikro türbinden çıkan egzoz gazının kullanılması nedeniyle) daha yüksek ekserji kaybına sahip olduğu görülmüştür. Böylelikle önerilen sistemle ekserji kaybı % 81 azaltıldı. Ayrıca egzoz gazının çıkış sıcaklığı yaklaşık 2,93 K düşürülmüştür. Yanma odası ise ortalama % 20 ile en yüksek ekserji yıkım oranına sahip bileşen olduğu sonucuna varılmıştır (Kanbur ve ark., 2017b).

Pan ve ark. (2017), LNG'nin soğuk enerjisi kullanımını ve CO₂ yakalama ile Kalina çevrim sistemi ve organik Rankine çevriminden oluşan entegre bir güç üretim sistemi önermişlerdir. Sistem performansının değerlendirilmesi için termodinamik model oluşturulmuş ve sistem Aspen HYSYS yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Sistemin

ekserji analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, güç geri kazanım verimi ve ekserji verimi sırasıyla % 36 ve % 41,42 olarak bulunmuştur.

Atienza-Márquez ve ark. (2019a), LNG'nin yeniden gazlaştırmasından elde edilen ekserji kazanımıyla bir polijenerasyon sistemi modellemiştir. Sistemin performansı termodinamik ve çevresel açıdan incelenmiştir. Sonuçlar, sistemin % 40,6'lık bir ekserji verimine sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca tesiste kullanılan deniz suyunun, yıllık 75 bin ton CO₂ emisyonunun önüne geçtiği sonucuna varılmıştır.

Atienza-Márquez ve ark. (2019b), LNG'nin yeniden gazlaştırılmasından ekserji geri kazanımıyla bir birleşik soğutma ve güç sistemi önermişlerdir. Sonuçlara göre önerilen sistemin, % 40'lık bir ekserji verimi ile 139 kWh/t-LNG'ye eşdeğer bir elektrik tasarrufu sağladığı görülmüştür. Ayrıca yeniden gazlaştırma sürecinde, geri kazanılabilir maksimum soğuk enerjinin % 64'üne kadar faydalı enerjiye dönüştüğü bildirilmiştir.

Li ve ark. (2019), LNG'nin soğuk enerjisini ve düşük sıcaklıklı güneş enerjisini kullanan gelişmiş bir güç üretim sistemi önermişlerdir. Önerilen sistem ile geleneksel sistemler arasında karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Sonuçlar, önerilen sistemin net güç çıkışı ve sistem ısı veriminin, geleneksel sisteme göre sırasıyla % 9,3 ve % 7,33 daha yüksek olduğunu göstermiştir. Çalışma akışkanı olarak bütan kullanıldığında, birinci ve ikinci çevrim kondenser sıcaklığı, sırasıyla yaklaşık -55 °C ve -80 °C olduğunda sistemin ekserji verimi %13,44'e ulaştığı görülmüştür.

Liu ve ark. (2019), kademeli enerji kullanımı ve karbondioksit yakalama elde etmek için SOFC/GT/CO₂ çevrimi (katı oksit yakıt hücresi ve gaz türbini) ve LNG'nin soğuk enerjisi kullanımına sahip organik Rankine çevrimine dayalı yenilikçi bir birleşik soğutma, ısıtma ve güç sistemi önermişlerdir. Sistem performansı enerji ve ekserji yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, sistemin kapsamlı enerji kullanımının, net güç üretiminin ve toplam ekserji veriminin sırasıyla yaklaşık % 79.48, % 79.81 ve % 62.29'a ulaşabileceğini ayrıca katı oksit yakıt hücresinin güç üretim veriminin ise % 50.96 olduğunu göstermiştir.

Ghorbani ve ark. (2020a), düşük sıcaklıkta organik Rankine çevrimi, gaz ve buhar birleşik güç çevrimleri ve Kalina güç üretim çevriminden oluşan entegre bir güç üretim sistemi geliştirmişlerdir. Sisteme ekserji ve sıkıştırma analizi uygulamışlardır. Hibrit sistemin soğutulmasını sağlamak için sıvılaştırılmış doğal gaz yeniden gazlaştırılması kullanılmıştır. Sistemin toplam elektrik, ısı ve ekserji verimleri sırasıyla % 48.62, % 55.18 ve % 67.74 olarak bulunmuştur. Ekserji analizi, reaktörlerin ve ısı değiştiricilerinin

en yüksek ekserji yıkımına sahip olduğunu ve toplam ekserji yıkımının sırasıyla % 59.91 ve % 15.76'sını oluşturduğunu ortaya koymuştur.

Yang ve ark. (2020), katı oksit yakıt hücresi (SOFC) ve nemli hava türbinine (HAT) dayalı olarak LNG tarafından tahrik edilen bir birleşik güç, ısıtma ve soğutma sistemi (CCHP), yani SOFC-HAT-CCHP sistemi kurmuşlardır. Enerji ve ekserji analizi yapılarak sistemin termodinamik performansı incelenmiştir. Sonuçlar, toplam ekserji verimi, toplam güç verimi ve toplam ısı veriminin sırasıyla % 64,7, % 54,4 ve % 79,1 olduğunu göstermektedir. Ayrıca CO₂ yakalama oranı ve saflığı sırasıyla % 98,7 ve % 98,9'dur. Önerilen sistemin, çevreyi koruyan, enerji tasarrufu sağlayan ve LNG alım terminallerindeki atık soğuk enerjiyi kullanan verimli bir sistem olabileceği düşünülmektedir.

Mosaffa ve ark. (2017), sıvılaştırılmış doğal gazın soğuk enerjisine dayalı ve (1) basit, (2) iç ısı değiştiricili, (3) rejeneratif ve (4) çift akışkanlı olmak üzere dört farklı birleşik organik Rankine çevrimlerine ekserji ve termoekonomik analiz uygulamışlardır. Bu santraller düşük dereceli ısı kaynağı olarak jeotermal akışkan enerjisini ve ısı kuyusu olarak LNG'nin soğuk enerjisini kullanır. Enerji ve ekserji verimliliklerini en üst düzeye çıkarmak ve toplam ürün birim maliyetini en aza indirmek için sistemin çalışma parametrelerinin optimum değerleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, rejeneratif ve iç ısı değiştiricili sistemden en yüksek enerji ve ekserji veriminin elde edildiğini, basit sistemin ise en düşük toplam ürün maliyetine sahip olduğunu göstermektedir. Optimum performans koşulunda, en yüksek ve en düşük toplam maliyet oranı sırasıyla çift-akışkanlı ve rejeneratif sistemlere ait olduğu bulunmuştur.

Xue ve ark. (2017), sıvılaştırılmış doğal gazın soğuk ekserjisi kullanımına dayanan çalışma akışkanları olarak ikili ve üçlü karışımları kullanan yeni bir kriyojenik Rankine enerji üretim sisteminin tasarımı ve optimizasyonunu yapmışlardır. Sisteme ekserji ve ekonomik analiz uygulanmıştır. Sonuç olarak, ısı ve ekserji verimliliklerinin performansları, ilk durumda % 3,5 ve % 7,16 iken, optimizasyon sonucunda bu oranlar % 17,33 ve % 25,7'ye çıkarılmıştır.

Ahmadi ve ark. (2017), düz plaka kolektörlerden güneş enerjisini ısı kaynağı olarak kullanan ve ısı kuyusu olarak da sıvılaştırılmış doğal gaz kullanan küçük ölçekli bir transkritik CO₂ güç çevriminin termoekonomik analizi ve çok amaçlı optimizasyonunu yapmışlardır. Optimizasyon sayesinde, sistemin genel verimi artırılmış ve tesisin toplam yatırımı en aza indirilmiştir.

Ghorbani ve ark. (2020b), çok aşamalı bir termal su tuzdan arındırma sistemi ve organik Rankine çevrimi kullanılarak tatlı su ve enerjinin kojenerasyonu için entegre bir yapı geliştirmişlerdir. Giriş ısısı için parabolik oluklu güneş kolektörleri, organik Rankine çevriminin kondenser soğutmasını sağlamak için ise LNG yeniden gazlaştırma işlemi kullanılmıştır. Sistemin ekserji ve ekonomik analizi yapılmıştır. Sistemin toplam ekserji verimi % 87.11 olup, ekserji yıkımının en yüksek olduğu ekipmanlar sırasıyla % 50.23 ve % 38.18 ile ısı değiştiricileri ve kolektörler olarak bulunmuştur. Ekonomik analiz sonucuna göre, 4,6 \$/m³ ve daha yüksek fiyatlardaki su tuzdan arındırma ürün maliyeti için, entegre sistemdeki geri dönüş süresinin 4 yıldan az olduğu görülmüştür.

Tian ve ark. (2020), deniz motoru egzoz gazının ısı kaynağı olarak kullanıldığı ve LNG'nin soğuk enerjisine dayalı, zeotropik karışımlar kullanılan, organik Rankine çevrimi için enerji, ekserji ve ekonomik (3E) analiz yapmışlardır. Sistemin maksimum enerji ve ekserji verimi, sırasıyla % 22.09 ve % 23.28 olarak bulunmuştur. Toplam maliyet, geri ödeme süresi ve seviyelendirilmiş enerji maliyetinin sırasıyla 5.98 - 8.08 × 105 \$, 4.58 - 5.18 yıl ve 0.065 - 0.074 \$/kWh aralığında değiştiği sonucuna varılmıştır.

Ghaebi ve ark. (2017), düşük sıcaklıklı ısı kaynağı olarak atık ısıyı ve ısı kuyusu olarak LNG'nin soğuk enerjisini kullanan yeni bir amonyak-su birleşik soğutma ve güç çevriminin enerji, ekserji ve eksergo-ekonomik analizlerini yapmışlardır. Sistem, Kalina döngüsüne dayanan yeni bir birleşik soğutma ve güç çevrimi ile bir LNG güç üretim alt çevriminden oluşur. Parametrik çalışmanın sonucunda, ısı kaynağı sıcaklığındaki ve LNG türbin giriş basıncındaki artışla veya kondenser sıcaklığındaki ve buhar jeneratörü basıncındaki düşüşle daha yüksek bir birinci yasa verimliliği elde edilebileceği görülmüştür. Bununla birlikte, ısı kaynağı sıcaklığındaki ve kondenser sıcaklığındaki düşüşle veya buhar jeneratörü basıncında, evaporatör sıcaklığında ve LNG türbin giriş basıncındaki artışla ikinci yasa veriminin artacağı sonucuna varılmıştır. Eksergo-ekonomik analiz ise soğutma çıkışı, güç çıkışı, LNG ve genel sistemin, ürünlerin toplam birim maliyetinin (SUCP) sırasıyla 229.9 \$/GJ, 145.1 \$/GJ, 10.56 \$/GJ ve 133.7 \$/GJ'ye kadar elde edilebileceğini göstermiştir.

Mehrpooya ve ark. (2017), bir termal depolama tankı aracılığıyla bir parabolik oluklu güneş kolektörü ile birleştirilen rejeneratif iki aşamalı organik Rankine çevrimi içeren yeni bir entegre sistemin ekserji ve eksergo-ekonomik analizini yapmışlardır. Sonuçlar güneş kolektörünün hem yüksek ekserji yıkımı hem de yüksek yatırım maliyeti nedeniyle $\dot{Z} + \dot{C}_D$ 'nın (yatırım maliyet oranı + ekserji yıkım maliyet oranı) en yüksek değere sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca depolama tankının kütle akış oranı ve LNG

basıncının, sistem ekserji verimi ve ürün maliyet oranı üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Ghaebi ve ark. (2018), ısı kuyusu olarak sıvılaştırılmış doğal gazın soğuk enerjisini kullanan ve jeotermal ısı kaynağı ile çalışan yeni bir trijenerasyon sisteminin enerji, ekserji ve eksergo-ekonomik analizini incelemişlerdir. Sonuçlar, kondenserin, tüm bileşenler arasında en yüksek ekserji yıkımını oluşturduğunu göstermiştir. Jeneratör sıkıştırma noktası sıcaklık farkının, ısıtma ünitesi sıcaklığının, evaporatör sıcaklığının ve jeotermal giriş sıcaklığının artması veya absorber ile kondenser sıcaklıklarının düşürülmesi net güç artışıyla sonuçlanacaktır. Daha yüksek bir ısıl verimlilik, yüksek evaporatör sıcaklığında veya düşük kondenser, ısıtma ünitesi ve absorber sıcaklığında hesaplanabilir. Yüksek evaporatör sıcaklığında veya düşük absorber ve kondenser sıcaklıklarında daha yüksek ekserji verimi elde edilebilir. Yüksek ısıtma ünitesi ve evaporatör sıcaklığında veya düşük absorber ve kondenser sıcaklıklarında sistemin toplam ürün maliyeti daha düşük olabilir.

Habibi ve ark. (2018a), güneş enerjili amonyak-su rejeneratif Rankine çevrimi ve LNG soğuk enerji geri kazanım sisteminden oluşan bir sistemi termo-ekonomik açıdan analiz etmişlerdir. En fazla ekserji yıkımı güneş kolektörü, kondenser ve evaporatörde görülmüştür ve bu üç bileşendeki ekserji yıkımının toplamı, sistemin toplam maliyet oranında belirleyici bir role sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, kondenser ve buharlaştırıcıdaki eksergo-ekonomik faktördeki artış, sistemin toplam ekserji yıkımını etkilediği için sistem performansını iyileştirebileceği sonucuna varılmıştır.

Habibi ve ark. (2018b), dizel motor egzoz gazının atık ısı geri kazanımı için, Organik Rankine Çevrimi (ORC) ve LNG güç sistemi ile Kısmi Buharlaşma Rankine Çevriminden (PERC) oluşan yeni bir konfigürasyon önermiş ve sistemi termo-ekonomik açıdan analiz etmişlerdir. Yapılan analiz sonucunda, ekserji açısından en kötü ve en iyi performanslar sırasıyla nispeten ORC kondenser ve PERC bileşenlerinde görülmüştür. Türbinlerin ürettiği elektriğin birim maliyeti için elde edilen değerlere göre, LNG ve PERC, eksergoekonomik açıdan ORC'den daha iyi bir işleyişe sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca farklı organik akışkanlar için enerji üretiminin ekserji verimi 0.3684 ile 0.3773, kojenerasyon sisteminin ekserji verimi ise 0.3835 ile 0.3921 arasında değişmektedir.

Kanbur ve ark. (2019), yeni bir küçük ölçekli kriyojenik CO₂ yakalama ve LNG'nin soğuk enerjisini kullanan bir sistemi ekserjik ve eksergoekonomik yaklaşımlarla incelemiştir. Sonuçlar, içindeki su buharını yoğuşturun eşanjörün ortalama

%52.01'lik bir pay ile en yüksek ekserji yıkım oranına sahip olduğunu gösterirken, yanma odası için ortalama 1.21'lik pay ile en yüksek seviyelendirilmiş yıkım maliyetine sahip olduğunu göstermiştir. Ekserjik ve termoekonomik değerlendirmeler, önerilen sistemin geliştirilmesi için ikinci yasa ile ilgili analizlerin önemini ortaya koymuştur.

Ghorbani ve ark. (2020c), kriyojenik hava ayırma ünitesi, Fischer -Tropsch sentez ünitesi, buhar santrali ve organik Rankine güç üretim ünitesi kullanılarak sıvı yakıt ve güç üretimi için entegre bir yapı geliştirmiş ve enerji, ekserji ve ekonomik açıdan analiz etmişlerdir. Sistemin soğutma ve ısıtmasını sağlamak için sırasıyla sıvılaştırılmış doğal gazı yeniden gazlaştırma işlemi ve çanak güneş kolektörleri kullanılmıştır. Entegre yapının enerji ve ekserji verimleri sırasıyla % 42,36 ve % 64,72 olarak bulunmuştur. Ekonomik analiz, önerilen sistemin Tahran'da kullanıma uygun olduğunu ortaya koymuştur.

Cao ve ark. (2020), bir güneş gaz türbin sistemi, çok etkili deniz suyu tuzdan arındırma, LNG soğuk enerji geri kazanım ünitesi ve çift etkili absorpsiyonlu soğutucudan oluşan yeni bir enerji sistemi önermişlerdir. Sistemi kapsamlı bir şekilde değerlendirmek için enerji, ekserji ve ekonomik (3E) analizler yapılmıştır. Sonuçlar, önerilen sistemin, net enerji ve ekserji veriminin sırasıyla % 92.11 ve % 60.05 olarak bulunduğunu göstermiştir. Elektrik, soğutma, damıtılmış su ve ısıtma maliyet oranları ise sırasıyla 31.627 \$/h, 3.404 \$/h, 0.198 \$/h, 0.00038 \$/h olarak hesaplanmış ve toplam ürün maliyet oranı 36.75 \$/h olarak bulunmuştur. Önerilen yenilenebilir enerji sisteminin, kömür ve doğal gaz bazlı enerji sistemine göre daha avantajlı olduğu ortaya çıkmıştır. Kömür bazlı enerji sistemine kıyasla yılda 485 ton daha az CO₂ emisyonu sağlarken, doğal gaz bazlı enerji sistemine kıyasla 6 \$/h daha düşük maliyet oranına sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Ayou ve Eveloy (2020), sıvılaştırılmış doğal gazın soğuk ekserjisini kullanan, düşük dereceli atık ısı (70-100 °C) kaynaklı, amonyak-su absorpsiyonlu güç-soğutma (APC) çevrimi temelli bir sistem önermişlerdir. Sistemin enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizi yapılmıştır. Hem LNG'nin bölge iklimlendirmesi için bir soğuk kaynak olarak kullanılması hem de APC çevriminin absorber ısı emici olarak kullanılması performans iyileştirilmesini sağlamıştır. APC alt çevrimi, net elektrik güç çıkışı ve soğutma kapasitesini sırasıyla % 18 ve % 66 oranında artırmıştır. Ayrıca sistem genel soğutma-güç oranı 4,4'den 7,3'e çıkarılmış ve sistem genel etkili birinci yasa verimi 4 kat artırılmıştır. Toplam sistem eksergoekonomik maliyetinin yaklaşık % 58'i ekserji yıkımı ve kaybı ile ilgilidir. Ekserji yıkım maliyetleri nedeniyle eksergoekonomik açıdan

en önemli bileşenlerin, LNG soğutma ısı eşanjörü ve APC alt çevrimli absorber-evaporatör olduğu görülmüştür.

2.2. İleri Ekserji ve Eksergo-ekonomik Analiz

Morosuk ve Tsatsaronis (2011), LNG'nin yeniden gazlaştırılması ile elektrik üretiminin birleştirilmesine dayanan yeni bir kojenerasyon sistemi tasarlamışlar ve sistemin ileri ekserji analizini yapmışlardır. Genel olarak tüm bileşenlerin %80'in üzerinde bir ekserjetik verimliliğe sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca sistemin iyileştirilmesi için en fazla önceliğe sahip olan bileşenin, genişletici II olduğu sonucuna varılmıştır.

Tesch ve ark. (2016), LNG'nin yeniden gazlaştırılması işlemine dayanan bir hava ayırma sistemine ileri ekserji analizi uygulamışlardır. Analiz sonucunda, ısı değiştiricilerin önemli tersinmezlikler içerdiği görülmüştür. Ayrıca LNG akış basıncının yükselmesiyle, genel ekserji yıkımının düşeceği sonucuna ulaşılmıştır.

Yargholi ve ark. (2020), tatlı su üretimi için gerekli ters ozmoz tuzdan arındırma gücünü sağlamak için jeotermal enerji kaynağı ile entegre edilmiş karbondioksit güç çevrimi önermişlerdir. Aynı zamanda daha fazla güç üretmek için sıvı doğal gazın yeniden gazlaştırılması işlemi kullanılmıştır. Sistemin ileri ekserji analizi yapılmıştır. Sonuçlara göre, kondenserin en yüksek ekserji yıkım oranına sahip bileşen olduğu görülmüştür. Ayrıca karbondioksit türbininin ekserji yıkımının kaçınılmaz kısmı, toplam ekserji yıkımının %88'ini oluşturmuştur. Buna göre, ekserji yıkımını iyileştirmek için en iyi seçeneğin karbondioksit türbini olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Zhang ve ark. (2020), transkritik CO₂ enerji depolama ve Organik Rankine Çevrimine dayalı bir entegre güç sistemi önermişlerdir. LNG'nin soğuk enerjisi, ısı kuyusu olarak kullanılmıştır. Sistemin performans analizi, geleneksel ekserji ve ileri ekserji analizi kullanılarak yapılmıştır. Geleneksel ekserji analizi, en çok ekserji yıkımının LNG-R290 ısı değiştiricisinde olduğunu göstermiştir. İleri ekserji analizinde ise en büyük kaçınılabılır ekserji yıkım değeri R290-Thermal oil ısı değiştiricisinde olduğu görülmüş ve sistem performansını artırmak için bu bileşene yoğunlaşılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anvari ve ark. (2015), 30 MW güç üretimi, 40 MW ısı üretimi ve 2 MW soğutma kapasitesine sahip trijenerasyon bir sistemin, geleneksel ve ileri, ekserji ve eksergo-ekonomik analizini yapmışlardır. Yanma odasının, hem geleneksel hem de ileri ekserji

analizi sonucuna göre, genel ekserji yıkımı ve çevrimin ekserji yıkımıyla ilgili maliyet oranlarına, en yüksek katkıyı sağladığı görülmüştür. Ayrıca yeni ekserjik ve eksergo-ekonomik kavramlar kullanılmasının, sistemin iyileştirilmesi açısından değerli bilgiler sağladığı sonucuna varılmıştır.

Asgari ve ark. (2017), iç otomatik kademeli soğutma çevriminin ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizlerini yapmışlardır. Analiz sonucunda, temel tasarım noktasına göre sırasıyla toplam kaçınılabilir ekserji yıkım oranı, toplam kaçınılabilir yatırım ve toplam kaçınılabilir ekserji yıkım maliyet oranlarında sırasıyla % 76,78, % 38,66 ve % 103,38 iyileştirmeler meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır.

Mehrpooya ve ark. (2018), sıvılaştırılmış doğal gazın soğuk enerjisi geri kazanımına dayanan karbondioksit güç çevrimine sahip yeni bir hava ayırma ünitesi sistemine geleneksel ve ileri, ekserji ve eksergo-ekonomik analizler uygulamışlardır. Proses bileşenlerinin çoğunda ekserji yıkımı, ekserji yıkım maliyeti ve yatırım maliyeti oranları içsel olarak bulunmuştur. Dolayısıyla bu bileşenlerin verimliliğini artırmanın veya daha verimli olanlarla değiştirmenin, proses toplam maliyet oranını düşürebileceği vurgulanmıştır.

Oyekale ve ark. (2020), hibrit bir güneş-biyokütle organik Rankine çevrimli kojenerasyon sisteminin, iyileştirme potansiyellerini araştırmak için ileri eksergo-ekonomik analizini yapmışlardır. Bu çalışmanın temel katkısı, akış enerji kalitesini maliyet oluşturma sürecine dahil ederek, ileri eksergo-ekonomik analizde geleneksel yardımcı ekserji maliyetinin değiştirilmesine odaklanmaktadır. Sonuçlar, ileri eksergo-ekonomik yöntemde, yardımcı ekserji maliyetinin, analizde önemli bir rol oynadığını ve bu çalışmada sunulan değiştirilmiş yaklaşımın geçerli bir seçim olduğunu göstermiştir.

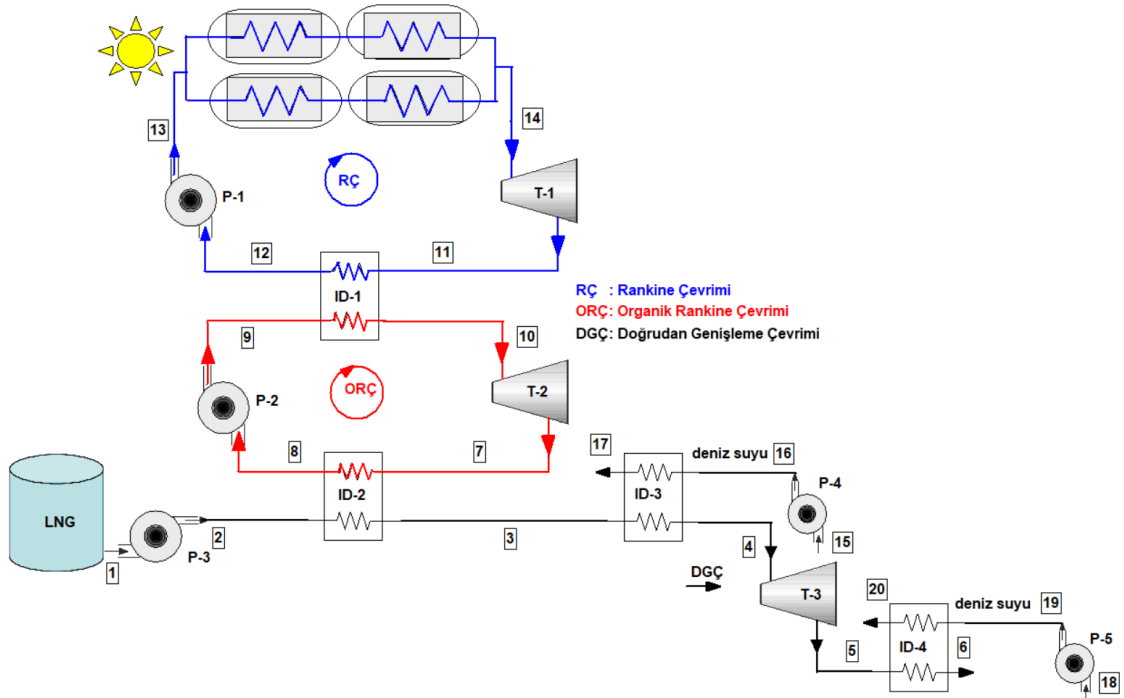
Uysal (2020), doğal gazla çalışan bir elektrik üretim tesisine, ileri ekserji analizi ve MOPSA yöntemini birleştiren bir ileri eksergo-ekonomik analiz uygulamıştır. Elde edilen sonuçlar, başka bir ileri eksergo-ekonomik analizle karşılaştırılmıştır. Buna göre, ekserji yıkım maliyet oranları için, diğer analiz sonucunun bu çalışmada önerilen analiz sonucundan çok daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca bu çalışma, ekserji yıkım oranının maliyetlendirilmesine ilişkin geleneksel eksergo-ekonomik analizin yetersizliklerini ve başarısızlıklarını ortaya koymuştur.

Edinilen bilgilerden de anlaşılacağı üzere, LNG'nin kriyojenik enerjisini kullanan güç sistemleri hakkındaki çalışmalar günceldir. Dünyada doğal gaz tüketimi yaygın olmasına rağmen LNG'nin yeniden gazlaştırılmasıyla ortaya çıkan soğuk enerjinin tam

anlamıyla etkin kullanıldığı söylenemez. LNG'nin bu soğuk enerjisinin etkin kullanımı için yapılan çalışmalar LNG'nin önemini gittikçe artırdığını vurgulamaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Şekil 3.1’de amaçlanan birleşik güç sisteminin şematik görüntüsü verilmiştir. Bu sistem güneş enerjisini ısı kaynağı olarak kullanan bir Rankine çevrimi (RÇ) ve alt çevrimleri olan Organik Rankine (ORÇ) ve doğrudan genişleme doğalgaz çevriminden (DGÇ) oluşmaktadır. ORÇ için düşük sıcaklıklarda verimi daha yüksek olan propan çalışma akışkanı seçilmiştir (Abadi ve ark., 2014). Birleşik güç sistemi, sıvılaştırılmış doğal gazın soğuk enerjisini ısı kuyusu olarak kullanmaktadır. Parabolik kolektörlerden güneş ışınımı alınarak Rankine çevrimine ısı kaynağı oluşturulmaktadır. Şehir kullanımına sunulacak olan doğal gazın sıcaklık kontrolü için ısı değiştirici-4 (ID-4) sisteme konulmuştur. Pompa-3 (P-3) ile yüksek basınca sıkıştırılan sıvılaştırılmış doğal gaz, ısı değiştirici 3 (ID-3) ve ısı değiştirici-4’te transfer olan ısıyı üzerine alarak türbin-3’te (T-3) hedeflenen basınca indirilirken ayrıca güç elde edilmesi de sağlanmıştır. Sistem şu şekilde çalışmaktadır. RÇ kondenserinden çıkan 12 numaralı akış pompa-1 (P-1) vasıtası ile 13 numaralı akışın hedeflenen basıncına sıkıştırılmaktadır. 14 numaralı akış parabolik güneş kolektörlerinden (PGK) olan ısı transferi ile sıcaklığını yükselterek türbin 1’de genişlemekte ve güç üretilmektedir. Böylece RÇ tamamlanmaktadır. RÇ’nin kondenseri olan ısı değiştiricisi-1 (ID-1), ORÇ için ısı kaynağı olmaktadır. 9 numaralı akış bu ısıyı üzerine alarak türbin-2 (T-2)’ye girmekte ve burada akışın genişlemesi ile güç üretilmektedir. Sıcaklığı ve basıncı düşen 7 numaralı akış ısı değiştirici-2 (ID-2) ile ısısını LNG’ye vermekte ve daha sonra pompa-2 (P-2) vasıtası ile türbin-2’nin basıncına sıkıştırılarak çevrim tamamlanmaktadır.



Şekil 3.1. Güneş enerjisini ısı kaynağı olarak kullanan ve LNG'nin soğuk enerjisini kullanan birleşik güç sisteminin şematik diyagramı

3.1. Sistemin Matematik Modeli ve Kabuller

Sistemin ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizi için geliştirilen matematik modelin çözümünde Engineering Equation Solver (EES) programı kullanılmıştır. Matematik modelin yönetici denklemlerini enerji ve kütle korunum denklemleri ile ekserji ve maliyet denge denklemleri oluşturmaktadır. Matematik modelin çözümünde aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- Sistemi oluşturan her bir bileşen kontrol hacmini oluşturmakta ve sürekli akış kabulü ile çalışmaktadır.
- Isı değiştiricileri ve sistem bileşenlerini birbirine bağlayan borularda basınç kaybı olmamaktadır.
- Ortam sıcaklık ve basıncı sırası ile 298.15 K ve 101.3 kPa'dır.
- Türbin ve pompalar izantropik verime sahiptir.
- Sistem bileşenlerindeki kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir.
- RC ısı değiştirici-1 çıkışında buharın durumu doymuş sıvı olarak kabul edilmiştir.
- ORÇ ısı değiştirici-2 çıkışında çalışma akışkanının durumu doymuş sıvı olarak kabul edilmiştir.

Sistemin tasarımı için girdi değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Amaçlanan sistemin simülasyon koşulları

| Çevrim | Parametre | Sembol | Değer |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------|
| RÇ-Güneş | Güneşin yüzey sıcaklığı (Liang, 2013) | $T_{güneş}$ | 5750 [K] |
| | Direkt güneş ışınım yoğunluğu (Morrone ve ark., 2019) | G | 800 [W/m ²] |
| | Açıklık uzunluğu (Baghernejad ve Yaghoubi, 2010), (Cohen ve ark., 1999) | a | 5.76 [m] |
| | Kolektör uzunluğu (Baghernejad ve Yaghoubi, 2010), (Cohen ve ark., 1999) | L | 99 [m] |
| | Pompa-1 giriş basıncı | P_{12} | 100 [kPa] |
| | Aşırı kızdırma sıcaklığı | $\Delta T_{st-RÇ}$ | 5 [°C] |
| | Türbin giriş sıcaklığı | T_{14} | 165 [°C] |
| ORÇ | Basınç oranı | $P_{R-ORÇ}$ | 7 [-] |
| | Aşırı kızdırma sıcaklığı | $\Delta T_{st-ORÇ}$ | 10 [°C] |
| LNG Hattı | Pompa-3 giriş basıncı | P_1 | 100 [kPa] |
| | Pompa-3 çıkış basıncı | P_2 | 8000 [kPa] |
| | Pompa-3 giriş sıcaklığı (Mehrpooya ve ark., 2016a) | T_1 | -162 [°C] |
| Deniz Suyu Hattı | Pompa-4-5 giriş sıcaklığı (Qu ve ark., 2015) | T_{15}, T_{18} | 20 [°C] |
| | Isı değiştiricisi-3-4 çıkış sıcaklığı (Bao ve ark., 2017) | T_{17}, T_{20} | 10 [°C] |
| | Pompa-4-5 giriş basıncı (Choi ve ark., 2013) | P_{15}, P_{18} | 100 [kPa] |
| | Pompa-4-5 çıkış basıncı (Choi ve ark., 2013) | P_{16}, P_{19} | 300 [kPa] |

3.2. Enerji ve Geleneksel Ekserji Analizi

Enerji analizi için sistemin amaç fonksiyonu enerji verim (birinci yasa verimi) olarak değerlendirilmiştir. Enerji analizi bir sistemin performansını değerlendirmek için tek başına yeterli değildir. Ekserji analizi sistemin kullanılabilir performansı hakkında ölü hal koşullarına göre bilgi vermektedir. Bu durum sistem performansı hakkında enerji analizine göre daha sağlıklı sonuçlara ulaşabilmemizi sağlamaktadır. Ekserji analizi için amaç fonksiyonları ekserji yıkımı, ekserji yıkım oranı ve her bir bileşen ve bütün sistem için ekserji verimi (ikinci yasa verimi) olarak değerlendirilmiştir. Ekserji veriminin

bulunması için yakıt ve ürün ekserji değerleri hesaplanmıştır. Bir sistemin yakıt ekserjisi, sistemin amacı olan ürün ekserjisini elde etmek için kullanılabilen potansiyel olarak tanımlanabilir.

Amaçlanan birleşik güç sisteminin termodinamik analizi için kontrol hacmi olarak düşünülen her bir sistem bileşenine ait enerji denge denklemleri aşağıda verilmiştir. Sistem elemanlarındaki kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir.

Parabolik Güneş Kolektörü (PGK) :

$$\dot{Q}_{PGK} = \eta_{PGK} \cdot A_a \cdot N \cdot \frac{G}{1000} = \dot{m}_{güneş}(h_{14} - h_{13}) \quad (3.1)$$

Türbin 1 (T-1) :

$$\dot{W}_{T1} = \dot{m}_{güneş}(h_{14} - h_{11}) \quad (3.2)$$

$$\eta_{T1} = \frac{(h_{14} - h_{11})}{(h_{14} - h_{11s})} \quad (3.3)$$

Isı Değiştiricisi 1 (ID-1) :

$$\dot{Q}_{ID1} = \dot{m}_{güneş}(h_{11} - h_{12}) = \dot{m}_{ORÇ}(h_{10} - h_9) \quad (3.4)$$

Pompa 1 (P-1) :

$$\dot{W}_{P1} = \dot{m}_{güneş}(h_{13} - h_{12}) \quad (3.5)$$

$$\eta_{P1} = \frac{(h_{13s} - h_{12})}{(h_{13} - h_{12})} \quad (3.6)$$

Türbin 2 (T-2) :

$$\dot{W}_{T2} = \dot{m}_{ORÇ}(h_{10} - h_7) \quad (3.7)$$

$$\eta_{T2} = \frac{(h_{10} - h_7)}{(h_{10} - h_{7s})} \quad (3.8)$$

Pompa 2 (P-2) :

$$\dot{W}_{P2} = \dot{m}_{ORÇ}(h_9 - h_8) \quad (3.9)$$

$$\eta_{P2} = \frac{(h_{9s} - h_8)}{(h_9 - h_8)} \quad (3.10)$$

Isı Değiştiricisi 2 (ID-2) :

$$\dot{Q}_{ID2} = \dot{m}_{ORÇ}(h_7 - h_8) = \dot{m}_{CH4}(h_3 - h_2) \quad (3.11)$$

Pompa 3 (P-3) :

$$\dot{W}_{P3} = \dot{m}_{CH4}(h_2 - h_1) \quad (3.12)$$

$$\eta_{P3} = \frac{(h_{2s} - h_1)}{(h_2 - h_1)} \quad (3.13)$$

Isı Değiştiricisi 3 (ID-3) :

$$\dot{Q}_{ID3} = \dot{m}_{CH4}(h_4 - h_3) = \dot{m}_{ds}(h_{16} - h_{17}) \quad (3.14)$$

Türbin 3 (T-3) :

$$\dot{W}_{T3} = \dot{m}_{CH4}(h_4 - h_5) \quad (3.15)$$

$$\eta_{T3} = \frac{(h_4 - h_5)}{(h_4 - h_{5s})} \quad (3.16)$$

Isı Değiştiricisi 4 (ID-4) :

$$\dot{Q}_{ID4} = \dot{m}_{CH4}(h_6 - h_5) = \dot{m}_{ds}(h_{19} - h_{20}) \quad (3.17)$$

Pompa 4 (P-4) :

$$\dot{W}_{P4} = \dot{m}_{ds}(h_{16} - h_{15}) \quad (3.18)$$

$$\eta_{P4} = \frac{(h_{16s} - h_{15})}{(h_{16} - h_{15})} \quad (3.19)$$

Pompa 5 (P-5) :

$$\dot{W}_{P5} = \dot{m}_{ds}(h_{19} - h_{18}) \quad (3.20)$$

$$\eta_{P5} = \frac{(h_{19s} - h_{18})}{(h_{19} - h_{18})} \quad (3.21)$$

Sistem sadece güç üretmek için değil aynı zamanda sıvılaştırılmış doğal gazı şehre arz haline getirebilmek için de tasarlanmıştır. Sistemin enerji verimi sistemin amacı düşünülerek aşağıdaki gibi yazılmıştır:

$$\eta_{sistem} = \frac{\dot{W}_{net} + (\dot{H}_6 - \dot{H}_1)}{\dot{Q}_{gir}} \cdot 100\% \quad (3.22)$$

Burada \dot{W}_{net} sistemden elde edilen net güçtür. Sistemdeki türbinlerden üretilen güçten, pompalarda harcanan gücün çıkarılması ile hesaplanmıştır.

$$\dot{W}_{net} = (\dot{W}_{T1} + \dot{W}_{T2} + \dot{W}_{T3}) - (\dot{W}_{P1} + \dot{W}_{P2} + \dot{W}_{P3} + \dot{W}_{P4} + \dot{W}_{P5}) \quad (3.23)$$

\dot{Q}_{in} sisteme giren ısıdır ve aşağıdaki denklem ile bulunmuştur.

$$\dot{Q}_{gir} = G \cdot A_a \cdot N + \dot{Q}_{ID-3} + \dot{Q}_{ID-4} \quad (3.24)$$

Burada G, A_a ve N sırasıyla direkt güneş ışınım yoğunluğu, kolektör açıklık alanı ve kolektör sayısıdır.

Bir akışın toplam ekserjisi aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Ozen ve ark., 2020):

$$E\dot{x} = E\dot{x}^{TM} + E\dot{x}^{CHE} + E\dot{x}^{KN} + E\dot{x}^{PT} \quad (3.25)$$

Burada $\dot{E}x^{TM}$, $\dot{E}x^{CHE}$, $\dot{E}x^{KN}$, $\dot{E}x^{PT}$ sırası ile termomekanik, kimyasal, kinetik ve potansiyel ekserjileri göstermektedir. Sistem bileşenlerindeki kinetik ve potansiyel ekserji değişimleri ihmal edilmiştir. Ayrıca sistem içindeki hiçbir bileşende kimyasal reaksiyon gerçekleşmemektedir. Bu yüzden bu çalışmada kimyasal ekserji de dikkate alınmamıştır.

Termomekanik ekserji, termal ($\dot{E}x^T$) ve mekanik ($\dot{E}x^M$) ekserji olarak alt bölümlere ayrılabilir ve bu ekserjiler aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

$$\dot{E}x^{TM} = \dot{m} \{ h(T, P) - h(T_0, P_0) - T_0 [s(T, P) - s(T_0, P_0)] \} \quad (3.26)$$

$$\dot{E}x^T = \dot{m} \{ h(T, P) - h(T_0, P) - T_0 [s(T, P) - s(T_0, P)] \} \quad (3.27)$$

$$\dot{E}x^M = \dot{m} \{ h(T_0, P) - h(T_0, P_0) - T_0 [s(T_0, P) - s(T_0, P_0)] \} \quad (3.28)$$

Geleneksel ekserji analizinde amaç fonksiyonu olarak değerlendirilen ekserji yıkımı $\dot{E}x_{D,k}$, ekserji yıkım oranı $Y_{D,k}$ ve ekserji verimi ε_k her bir “k” bileşeni için aşağıdaki denklemler ile bulunmuştur.

$$\dot{E}x_{D,k} = \dot{E}x_{F,k} - \dot{E}x_{P,k} \quad (3.29)$$

$$Y_{D,k} = \frac{\dot{E}x_{D,k}}{\dot{E}x_{F,k}} \quad (3.30)$$

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{E}x_{P,k}}{\dot{E}x_{F,k}} \quad (3.31)$$

Ayrıca “k” bileşenin bağıl ekserji yıkım oranı ($Y_{D,k}^*$) aşağıdaki denklem ile bulunmuştur (Mehrpooya ve ark., 2016a), (Zhang ve ark., 2020). $Y_{D,k}^*$ bileşen ekserji yıkımının sistemin toplam ekserji yıkımının yüzdelik olarak ne kadar kısmını oluşturduğu konusunda bilgi vermektedir.

$$Y_{D,k}^* = \frac{\dot{E}x_{D,k}}{\dot{E}x_{D,t}} \quad (3.32)$$

Burada $\dot{E}x_{D,t}$, sistemdeki bütün bileşenlerin ekserji yıkım değerlerinin toplamını göstermektedir.

Sistemin ekserji verimi:

$$\varepsilon_{sistem} = 1 - \left(\frac{\dot{E}x_{D,t}}{\dot{E}x_{F,t}} \right) \quad (3.33)$$

Burada $\dot{E}x_{F,t}$, sistem bileşenlerinin toplam yakıt ekserjisidir.

Bu sistem için güneş enerjisinin girdi ekserjisi aşağıdaki eşitlik ile bulunmuştur.

$$\dot{E}x_{güneş} = \frac{G \cdot A_a \cdot N}{1000} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{güneş}} \right) \quad (3.34)$$

Burada G ve $T_{güneş}$ sırasıyla güneş ışınımı ve güneşin yüzey sıcaklığıdır.

Birleşik sistemi oluşturan her bir eleman için yakıt ($E\dot{x}_F$) ve ürün ($E\dot{x}_P$) ekserjisi denklemleri aşağıda verilmiştir. Kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edilmiştir.

Parabolik Güneş Kolektörü (PGK):

$$\text{Yakıt Ekserjisi: } E\dot{x}_{\text{güneş}} + (E\dot{x}_{13}^M - E\dot{x}_{14}^M) \quad (3.35)$$

$$\text{Ürün Ekserjisi: } (E\dot{x}_{14}^T - E\dot{x}_{13}^T) \quad (3.36)$$

Türbin 1 (T-1):

$$\text{Yakıt Ekserjisi: } (E\dot{x}_{14}^T - E\dot{x}_{11}^T) + (E\dot{x}_{14}^M - E\dot{x}_{11}^M) \quad (3.37)$$

$$\text{Ürün Ekserjisi: } \dot{W}_{T1} \quad (3.38)$$

Isı Değiştiricisi 1 (ID-1):

$$\text{Yakıt Ekserjisi: } (E\dot{x}_{11}^T - E\dot{x}_{12}^T) + (E\dot{x}_{11}^M - E\dot{x}_{12}^M) + (E\dot{x}_9^M - E\dot{x}_{10}^M) \quad (3.39)$$

$$\text{Ürün Ekserjisi: } (E\dot{x}_{10}^T - E\dot{x}_9^T) \quad (3.40)$$

Pompa 1 (P-1):

$$\text{Yakıt Ekserjisi: } \dot{W}_{P1} \quad (3.41)$$

$$\text{Ürün Ekserjisi: } (E\dot{x}_{13}^T - E\dot{x}_{12}^T) + (E\dot{x}_{13}^M - E\dot{x}_{12}^M) \quad (3.42)$$

Türbin 2 (T-2):

$$\text{Yakıt Ekserjisi: } (E\dot{x}_{10}^T - E\dot{x}_7^T) + (E\dot{x}_{10}^M - E\dot{x}_7^M) \quad (3.43)$$

$$\text{Ürün Ekserjisi: } \dot{W}_{T2} \quad (3.44)$$

Pompa 2 (P-2):

$$\text{Yakıt Ekserjisi: } \dot{W}_{P2} \quad (3.45)$$

$$\text{Ürün Ekserjisi: } (E\dot{x}_9^T - E\dot{x}_8^T) + (E\dot{x}_9^M - E\dot{x}_8^M) \quad (3.46)$$

Isı Değiştiricisi 2 (ID-2):

$$\text{Yakıt Ekserjisi: } (E\dot{x}_2^T + E\dot{x}_7^T) + (E\dot{x}_2^M + E\dot{x}_7^M) - (E\dot{x}_3^M + E\dot{x}_8^M) \quad (3.47)$$

$$\text{Ürün Ekserjisi: } (E\dot{x}_3^T + E\dot{x}_8^T) \quad (3.48)$$

Pompa 3 (P-3):

$$\text{Yakıt Ekserjisi: } \dot{W}_{P3} \quad (3.49)$$

$$\text{Ürün Ekserjisi: } (E\dot{x}_2^T - E\dot{x}_1^T) + (E\dot{x}_2^M - E\dot{x}_1^M) \quad (3.50)$$

Isı Değiştiricisi 3 (ID-3):

$$\text{Yakıt Ekserjisi: } (E\dot{x}_{16}^T + E\dot{x}_3^T) + (E\dot{x}_{16}^M + E\dot{x}_3^M) - (E\dot{x}_4^M + E\dot{x}_{17}^M) \quad (3.51)$$

$$\text{Ürün Ekserjisi: } (E\dot{x}_4^T + E\dot{x}_{17}^T) \quad (3.52)$$

Türbin 3 (T-3):

$$\text{Yakıt Ekserjisi: } (E\dot{x}_4^T - E\dot{x}_5^T) + (E\dot{x}_4^M - E\dot{x}_5^M) \quad (3.53)$$

$$\text{Ürün Ekserjisi: } \dot{W}_{T3} \quad (3.54)$$

Isı Değiştiricisi 4 (ID-4):

$$\text{Yakıt Ekserjisi: } (\dot{E}x_{19}^T + \dot{E}x_5^T) + (\dot{E}x_{19}^M + \dot{E}x_5^M) - (\dot{E}x_6^M + \dot{E}x_{20}^M) \quad (3.55)$$

$$\text{Ürün Ekserjisi: } (\dot{E}x_6^T + \dot{E}x_{20}^T) \quad (3.56)$$

Pompa 4 (P-4):

$$\text{Yakıt Ekserjisi: } \dot{W}_{P4} \quad (3.57)$$

$$\text{Ürün Ekserjisi: } (\dot{E}x_{16}^T - \dot{E}x_{15}^T) + (\dot{E}x_{16}^M - \dot{E}x_{15}^M) \quad (3.58)$$

Pompa 5 (P-5):

$$\text{Yakıt Ekserjisi: } \dot{W}_{P5} \quad (3.59)$$

$$\text{Ürün Ekserjisi: } (\dot{E}x_{19}^T - \dot{E}x_{18}^T) + (\dot{E}x_{19}^M - \dot{E}x_{18}^M) \quad (3.60)$$

3.3. Geleneksel Eksergo-ekonomik Analiz

Eksergo-ekonomik analiz ekserji akışlarını maliyetlendirerek sistemin ekonomik açıdan değerlendirilmesi ile ekserji analizini birleştirir. Bu analizde, ekserji yıkım ve kayıplarının maliyetleri bulunarak sistem ürün maliyetlerinin azaltılması amaçlanmaktadır. Literatürde farklı eksergo-ekonomik analiz metotları bulunmaktadır. Bu çalışmada ekonomik model MOPSA metodu ile oluşturulmuştur.

3.3.1. MOPSA Metodu

MOPSA metodunda ekserji akışları termal, mekanik ve kimyasal gibi bölümlerine ayrılarak maliyetlendirilmektedir. Her sistem bileşeni için yazılan maliyet denge denklemlerinde ayrılan ekserji akış bölümlerine birim ekserji maliyet değerleri tanımlanması ile oluşturulan denklem takımı çözülmektedir. Sistem bileşeninin öne çıkan ürününe yeni bir birim maliyeti denklem numarasına göre özel olarak tanımlanmakta ve koyu harf ile gösterilmektedir. Üretim yapısı analizine dayanan ekserji maliyetlendirme metodunda sistemin amacına uygun bir birim maliyetin atanması çok önemli bir noktadır (Kwak ve ark., 2003).

Bu metot için genel maliyet dengesi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\begin{aligned} & \dot{E}x_{c_0}^{CHE} + \dot{E}x_{c_{BQ}}^{BQ} + (\sum \dot{E}x_{gir}^T - \sum \dot{E}x_{cik}^T) c_T + (\sum \dot{E}x_{gir}^M - \sum \dot{E}x_{cik}^M) c_M \\ & + T_0 (\sum \dot{S}_{gir} - \sum \dot{S}_{cik}) c_S + \dot{Z}_k = \dot{E}x_{c_W}^W \end{aligned} \quad (3.61)$$

Burada c_0 , c_T , c_M , c_S ve c_W ifadeleri sırasıyla kimyasal, termal ve mekanik ekserjilerin, entropi akışının ve sistemden üretilen işin birim maliyetlerini ifade etmektedir. c_{BQ} ifadesi ise sistemde kondenser görevi gören ekipmanlarda ikinci akışkan

olarak kullanılan ve sisteme dışarıdan tedarik edilip daha sonra tekrardan dışarı atılan akışkanların birim maliyetlerini ifade etmektedir (Uysal ve ark., 2017).

\dot{Z}_k , k elamanına ait ilk yatırım, işletme ve bakım masrafları ile ilgili zamana bağlı maliyet değeridir ve aşağıdaki denklem ile bulunmuştur.

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k \cdot CRF \cdot \varphi}{(N \cdot 3600)} \quad (3.62)$$

Burada φ , N ve Z_k sırasıyla bakım faktörü, sistemin yıllık çalışma saati ve k elamanına ait sermaye yatırım maliyetidir. Bu çalışmada φ , 1.06 ve N, 7000 olarak kabul edilmiştir ve sistemi oluşturan elemanların Z_k değerleri Tablo 3.2’de sistemi oluşturan her bir elaman için verilen denklemlerden elde edilmiştir (Nami ve ark., 2017a),(Ozen ve Uçar, 2020).

Tablo 3.2. Sistemi oluşturan elemanların Z_k değerleri

| Bileşen | Sermaye Maliyet fonksiyonu (Z_k) |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|
| PGK (Ashouri ve ark., 2018) | 240. (A_c) |
| T-1,T-2,T-3(Khaljani ve ark., 2015) | 6000. ($\dot{W}_T^{0.7}$) |
| ID-1,ID-2 (Ashouri ve ark., 2018) | 34.9. (A_{ID}) |
| ID-3,ID-4 (Bao ve ark., 2017) | 2143 + ($A_{ID}^{0.514}$) |
| P-1, P-2,P-3,P-4, P-5 (Bao ve ark., 2017) | 1120. ($\dot{W}_P^{0.8}$) |

CRF kapital geri kazanma faktörüdür ve aşağıdaki denklem ile bulunmuştur.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3.63)$$

Burada i yıllık faiz oranını ve n sistemin ekonomik ömrünü göstermektedir. Bu çalışmada i, 0.1 ve n, 20 yıl olarak kabul edilmiştir (Nami ve ark., 2017a).

Denklem 3.61’den görüldüğü gibi, MOPSA metodunda termomekanik ekserji termal ve mekanik bileşenlerine ayrılır ve ayrı ayrı maliyetlendirilir (Uysal ve ark., 2017). Sistem bileşenleri için MOPSA metodunda yazılan maliyet denge denklemleri aşağıda verilmiştir.

Parabolik Güneş Kolektörü (PGK):

$$(E\dot{x}_{PGK}^{güneş}) C_{güneş}^{**} + (E\dot{x}_{13}^T - E\dot{x}_{14}^T) C_{1T} + (E\dot{x}_{13}^M - E\dot{x}_{14}^M) C_M + (E\dot{x}_{dest,PGK}) C_S + \dot{Z}_{PGK} = 0 \quad (3.64)$$

Türbin 1 (T-1):

$$(\dot{E}x_{14}^T - \dot{E}x_{11}^T) c_T + (\dot{E}x_{14}^M - \dot{E}x_{11}^M) c_M + (\dot{E}x_{\text{dest},T-1}) c_S + \dot{Z}_{T-1} = (\dot{E}x_{T-1}^W) c_{W,T1} \quad (3.65)$$

Isı Değiştiricisi 1 (ID-1):

$$(\dot{E}x_{11}^T - \dot{E}x_9^T - \dot{E}x_{12}^T - \dot{E}x_{10}^T) c_{3T} + (\dot{E}x_{11}^M + \dot{E}x_9^M - \dot{E}x_{12}^M - \dot{E}x_{10}^M) c_M + (\dot{E}x_{\text{dest},ID-1}) c_S + \dot{Z}_{ID-1} = 0 \quad (3.66)$$

Pompa 1 (P-1):

$$(\dot{E}x_{12}^T - \dot{E}x_{13}^T) c_T + (\dot{E}x_{12}^M - \dot{E}x_{13}^M) c_{4M} + (\dot{E}x_{\text{dest},P-1}) c_S + \dot{Z}_{P-1} = (-\dot{E}x_{P-1}^W) c_{W,T1} \quad (3.67)$$

Türbin 2 (T-2):

$$(\dot{E}x_{10}^T - \dot{E}x_7^T) c_T + (\dot{E}x_{10}^M - \dot{E}x_7^M) c_M + (\dot{E}x_{\text{dest},T-2}) c_S + \dot{Z}_{T-2} = (\dot{E}x_{T-2}^W) c_{W,T2} \quad (3.68)$$

Isı Değiştiricisi 2 (ID-2):

$$(\dot{E}x_7^T + \dot{E}x_2^T - \dot{E}x_8^T - \dot{E}x_3^T) c_{6T} + (\dot{E}x_7^M + \dot{E}x_2^M - \dot{E}x_8^M - \dot{E}x_3^M) c_M + (\dot{E}x_{\text{dest},ID-2}) c_S + \dot{Z}_{ID-2} = 0 \quad (3.69)$$

Pompa 2 (P-2):

$$(\dot{E}x_8^T - \dot{E}x_9^T) c_T + (\dot{E}x_8^M - \dot{E}x_9^M) c_{7M} + (\dot{E}x_{\text{dest},P-2}) c_S + \dot{Z}_{P-2} = (-\dot{E}x_{P-2}^W) c_{W,T2} \quad (3.70)$$

Pompa 3 (P-3):

$$(\dot{E}x_1^T - \dot{E}x_2^T) c_T + (\dot{E}x_1^M - \dot{E}x_2^M) c_{8M} + (\dot{E}x_{\text{dest},P-3}) c_S + \dot{Z}_{P-3} = (-\dot{E}x_{P-3}^W) c_{W,T3} \quad (3.71)$$

Türbin 3 (T-3):

$$(\dot{E}x_4^T - \dot{E}x_5^T) c_T + (\dot{E}x_4^M - \dot{E}x_5^M) c_M + (\dot{E}x_{\text{dest},T-3}) c_S + \dot{Z}_{T-3} = (\dot{E}x_{T-3}^W) c_{W,T3} \quad (3.72)$$

Isı Değiştiricisi 3 (ID-3):

$$(\dot{E}x_{16}^T + \dot{E}x_3^T - \dot{E}x_{17}^T - \dot{E}x_4^T) c_{10T} + (\dot{E}x_{16}^M + \dot{E}x_3^M - \dot{E}x_{17}^M - \dot{E}x_4^M) c_M + (\dot{E}x_{\text{dest},ID-3}) c_S + \dot{Z}_{ID-3} = 0 \quad (3.73)$$

Isı Değiştiricisi 4 (ID-4):

$$(\dot{E}x_{19}^T + \dot{E}x_5^T - \dot{E}x_{20}^T - \dot{E}x_6^T) c_{11T} + (\dot{E}x_{19}^M + \dot{E}x_5^M - \dot{E}x_{20}^M - \dot{E}x_6^M) c_M + (\dot{E}x_{\text{dest},ID-4}) c_S + \dot{Z}_{ID-4} = 0 \quad (3.74)$$

Pompa 4 (P-4):

$$(\dot{E}x_{15}^T - \dot{E}x_{16}^T) c_T + (\dot{E}x_{15}^M - \dot{E}x_{16}^M) c_{12M} + (\dot{E}x_{\text{dest},P-4}) c_S + \dot{Z}_{P-4} = (-\dot{E}x_{P-4}^W) c_{W,T3} \quad (3.75)$$

Pompa 5 (P-5):

$$(\dot{E}x_{18}^T - \dot{E}x_{19}^T) c_T + (\dot{E}x_{18}^M - \dot{E}x_{19}^M) c_{13M} + (\dot{E}x_{dest,P-5}) c_S + \dot{Z}_{P-5} = (-\dot{E}x_{P-5}^W) c_{W,T3} \quad (3.76)$$

Junction T:

$$\left\{ \begin{aligned} &(\dot{E}x_{13}^T - \dot{E}x_{14}^T) + (\dot{E}x_{11}^T + \dot{E}x_9^T - \dot{E}x_{12}^T - \dot{E}x_{10}^T) + (\dot{E}x_7^T + \dot{E}x_2^T - \dot{E}x_8^T - \dot{E}x_3^T) \\ &+ (\dot{E}x_{16}^T + \dot{E}x_3^T - \dot{E}x_{17}^T - \dot{E}x_4^T) + (\dot{E}x_{19}^T + \dot{E}x_5^T - \dot{E}x_{20}^T - \dot{E}x_6^T) \end{aligned} \right\} c_T - (\dot{E}x_{13}^T - \dot{E}x_{14}^T) c_{1T} \\ - (\dot{E}x_{11}^T + \dot{E}x_9^T - \dot{E}x_{12}^T - \dot{E}x_{10}^T) c_{3T} - (\dot{E}x_7^T + \dot{E}x_2^T - \dot{E}x_8^T - \dot{E}x_3^T) c_{6T} - (\dot{E}x_{16}^T + \dot{E}x_3^T - \dot{E}x_{17}^T - \dot{E}x_4^T) c_{10T} - (\dot{E}x_{19}^T + \dot{E}x_5^T - \dot{E}x_{20}^T - \dot{E}x_6^T) c_{11T} = 0 \quad (3.77)$$

Junction M:

$$\left\{ (\dot{E}x_{12}^M - \dot{E}x_{13}^M) + (\dot{E}x_8^M - \dot{E}x_9^M) + (\dot{E}x_1^M - \dot{E}x_2^M) + (\dot{E}x_{15}^M - \dot{E}x_{16}^M) + (\dot{E}x_{18}^M - \dot{E}x_{19}^M) \right\} c_M - (\dot{E}x_{12}^M - \dot{E}x_{13}^M) c_{4M} - (\dot{E}x_8^M - \dot{E}x_9^M) c_{7M} - (\dot{E}x_1^M - \dot{E}x_2^M) c_{8M} - (\dot{E}x_{15}^M - \dot{E}x_{16}^M) c_{12M} - (\dot{E}x_{18}^M - \dot{E}x_{19}^M) c_{13M} = 0 \quad (3.78)$$

Sınır:

$$(\dot{E}x_6^T + \dot{E}x_{17}^T + \dot{E}x_{20}^T - \dot{E}x_1^T - \dot{E}x_{15}^T - \dot{E}x_{18}^T) c_T + (\dot{E}x_6^M + \dot{E}x_{17}^M + \dot{E}x_{20}^M - \dot{E}x_1^M - \dot{E}x_{15}^M - \dot{E}x_{18}^M) c_M + (-\dot{E}x_{dest,sınır}) c_S + \dot{Z}_{sınır} = 0 \quad (3.79)$$

*Kalın olarak belirtilen birim maliyetler, sistem bileşenlerinin üretim maliyetleridir.

** $c_{güneş} = 0$

Geleneksel ekserji analizi için amaç fonksiyonları; her bir bileşende birim ortalama yakıt ($c_{f,k}$) ve ürün ($c_{p,k}$) ekserji maliyeti, eksergo-ekonomik faktör (f_k) ve göreceli maliyet farkı (r_k) olarak düşünülmüştür (Anvari ve ark., 2015).

“k” bileşenine ait eksergo-ekonomik faktör aşağıdaki denklem ile bulunmaktadır. Bu değer ile sistem bileşeninin yatırım maliyeti göreceli olarak ekserji yıkım maliyeti ile kıyaslanmaktadır ve böylece hangisinin daha etkili olduğu ortaya konmaktadır.

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}} \quad (3.80)$$

Burada $\dot{C}_{D,k}$, k elamanına ait ekserji yıkım maliyetini göstermektedir ve aşağıdaki denklemler ile bulunmuştur (Uysal, 2020).

$$\dot{C}_{D,k} = c_{s,k} \dot{E}x_{D,k} \quad (3.81)$$

“k” bileşenine ait göreceli maliyet farkı aşağıdaki denklem ile bulunmaktadır (Mehrpooya ve ark., 2016a).

$$r_k = \frac{(c_{p,k} - c_{f,k})}{c_{f,k}} \quad (3.82)$$

3.4. İleri Ekserji Analizi

Enerji analizi bir sistemin performansı hakkında bilgi verir ama bunu yaparken enerjinin niteliğinden ziyade niceliğine göre değerlendirme yapar. Bu yaklaşım yüzeysel bir yaklaşımdır ve sistemin performansını iyileştirmek için sağlıklı bir yönlendirme yapmaz. Ekserji analizi enerjinin kullanılabilir alanına göre sistemi değerlendirir. Sistem bileşenlerindeki entropi üretimleri bu analiz ile bulunabilir. Bu analiz, enerji analizine göre performansı olumsuz etkileyen bileşenler için fikir verebilir ama bu olumsuzlukların neden kaynaklandığı hakkında bilgi vermez. İleri ekserji analizi ise sistem bileşenindeki entropi üretiminin kendisinden mi yoksa diğer sistem bileşenleri ile olan ilişkisinden mi kaynaklandığını araştırarak ekserji analizindeki bu eksikliği kapatır. Ayrıca iyileştirme çalışması yapılabilecek sistem bileşenleri için net bilgi verir. İleri ekserji analizinde ekserji dört bölüme ayrılır:

- İçsel ekserji yıkımı ($E\dot{x}_{D,k}^{EN}$): Sistem bileşenin kendi faaliyetinden kaynaklanan ekserji yıkımı.
- Dışsal ekserji yıkımı ($E\dot{x}_{D,k}^{EX}$): Sistem bileşenin faaliyeti sırasında diğer bileşenleri ile olan ilişkisinden kaynaklanan ekserji yıkımı.
- Kaçınılabılır ekserji yıkımı ($E\dot{x}_{D,k}^{AV}$): İmkânlar doğrultusunda yapılabilecek iyileştirme potansiyelini gösterir. Ekserji yıkımının kaçınılabılır bölümünü maliyet, çevresel etkiler, tasarım ve teknik imkânların durumu belirler.
- Kaçınılamaz ekserji yıkımı ($E\dot{x}_{D,k}^{UN}$): Günümüzün teknolojik sınırlandırmalarından dolayı ekserji yıkımının azaltılamayan bölümüdür.

$E\dot{x}_{D,k}^{EN}$ ve $E\dot{x}_{D,k}^{EX}$ değerleri tasarımcıyı sistemin çalışma performansını iyileştirmek için bir optimizasyon çalışmasına yönlendirirken $E\dot{x}_{D,k}^{AV}$ ve $E\dot{x}_{D,k}^{UN}$ değerleri sistem bileşenlerinin iyileştirme potansiyeli hakkında bilgi verir.

Bir “k” sistem bileşeni için $E\dot{x}_{D,k}^{EN}$ değeri bu bileşen gerçek koşulları ile çalışırken diğer sistem bileşenlerin ideal koşullarda çalıştığı düşünülerek hesaplanır. Amaçlanan birleşik sistem için bu koşullar Tablo 3.3’te verilmiştir. $E\dot{x}_{D,k}^{EX}$ değeri ise aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$E\dot{x}_{D,k}^{EX} = E\dot{x}_{D,k} - E\dot{x}_{D,k}^{EN} \quad (3.83)$$

Tablo 3.3. İleri ekserji analizi için girdi değerleri (Boyaghchi ve Sabaghian, 2016), (Nami ve ark., 2017b), (Oyekale ve ark., 2020)

| Çevrim | Bileşen | Durum | | Kaçınılamaz Durum | | | |
|----------------------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|
| | | Gerçek | İdeal | Ekserji Yıkımı | Yatırım maliyeti \dot{Z}_k^{UN} (çalışma koşulları veya % \dot{Z}_k) | | |
| RÇ | PGK | $\eta=65\%$ | $\eta=100\%$ | $\eta=73\%$ | 98% | | |
| | T-1 | $\eta=85\%$ | $\eta=100\%$ | $\eta=95\%$ | 90% | | |
| | ID-1 | $\Delta T=5^\circ\text{C}$ | $\Delta T=0^\circ\text{C}$ | $\Delta T=3^\circ\text{C}$ | $\Delta T=20^\circ\text{C}$ | | |
| | P-1 | $\eta=80\%$ | $\eta=100\%$ | $\eta=95\%$ | 90% | | |
| ORÇ | T-2 | $\eta=85\%$ | $\eta=100\%$ | $\eta=95\%$ | 90% | | |
| | ID-2 | $\Delta T=5^\circ\text{C}$ | $\Delta T=0^\circ\text{C}$ | $\Delta T=3^\circ\text{C}$ | $\Delta T=20^\circ\text{C}$ | | |
| | P-2 | $\eta=80\%$ | $\eta=100\%$ | $\eta=95\%$ | 90% | | |
| DGÇ | P-3 | $\eta=80\%$ | $\eta=100\%$ | $\eta=95\%$ | 90% | | |
| | T-3 | $\eta=85\%$ | $\eta=100\%$ | $\eta=95\%$ | 90% | | |
| | ID-3 | $\Delta T=5^\circ\text{C}$ | $\Delta T=0^\circ\text{C}$ | $\Delta T=3^\circ\text{C}$ | $\Delta T=9^\circ\text{C}$ | | |
| | ID-4 | $\Delta T=5^\circ\text{C}$ | $\Delta T=0^\circ\text{C}$ | $\Delta T=3^\circ\text{C}$ | $\Delta T=9^\circ\text{C}$ | | |
| $\dot{W}_{net} = 15000\text{kW}$ | | | | | | | |
| \dot{W}_{T1} | \dot{W}_{T2} | \dot{W}_{T3} | \dot{W}_{P1} | \dot{W}_{P2} | \dot{W}_{P3} | \dot{W}_{P4} | \dot{W}_{P5} |
| 4558 | 5994 | 6067 | 12 | 541 | 944 | 15 | 108 |

“k” bileşeni için $\dot{E}x_{D,k}^{UN}$ değerinin hesaplanmasında mümkün olan en iyi çalışma koşulları dikkate alınmalıdır. Bu çalışma koşulları, “k” bileşeninin performansını etkileyebilecek en önemli parametrelere göre belirlenir. Bu parametreler, “k” bileşeni içindeki ekserji yıkımının minimum değere indirilmesinde önemli role sahiptir (Anvari ve ark., 2015).

Amaçlanan güç sistemindeki bileşenlerin $\dot{E}x_{D,k}^{EN}$ ve $\dot{E}x_{D,k}^{UN}$ değerleri, Tablo 4.1’de verilen koşullara göre bulunmuştur.

“k” bileşeni için $\dot{E}x_{D,k}^{AV}$ değeri aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}x_{D,k}^{AV} = \dot{E}x_{D,k} - \dot{E}x_{D,k}^{UN} \quad (3.84)$$

Daha detaylı bir yaklaşım ile sistem performansını iletirmek için $\dot{E}x_{D,k}^{AV}$ ve $\dot{E}x_{D,k}^{UN}$ içsel ve dışsal ekserji yıkım bölümlerine ayrılarak incelenebilmektedir.

“k” bileşeni için $\dot{E}x_{D,k}^{UN}$ değerinin içsel ve dışsal ekserji yıkım bölümleri sırası ile $\dot{E}x_{D,k}^{UN,EN}$ ve $\dot{E}x_{D,k}^{UN,EX}$ olarak gösterilmektedir. $\dot{E}x_{D,k}^{AV}$ değerinin içsel ve dışsal ekserji yıkım bölümleri ise sırası ile $\dot{E}x_{D,k}^{AV,EN}$ ve $\dot{E}x_{D,k}^{AV,EX}$ olarak gösterilmektedir. Bu değerleri bulabilmek için öncelikle $\dot{E}x_{D,k}^{UN,EN}$ değeri bulunur. Bu değer bulunması, içsel ekserji

yıkım değerinin hesaplanmasına benzerdir. Tek farkı “k” bileşeni bu sefer gerçek koşullarda değil kaçınılmaz koşullarda yani bileşenin ekserji yıkımını minimum yapacak koşullarda çalışırken diğer sistem bileşenleri ideal koşullarda çalışmaktadır. $E\dot{x}_{D,k}^{UN,EN}$ bulunduktan sonra diğer ekserji yıkım değerleri aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$E\dot{x}_{D,k}^{UN,EX} = E\dot{x}_{D,k}^{UN} - E\dot{x}_{D,k}^{UN,EN} \quad (3.85)$$

$$E\dot{x}_{D,k}^{AV,EN} = E\dot{x}_{D,k}^{EN} - E\dot{x}_{D,k}^{UN,EN} \quad (3.86)$$

$$E\dot{x}_{D,k}^{AV,EX} = E\dot{x}_{D,k}^{AV} - E\dot{x}_{D,k}^{AV,EN} \quad (3.87)$$

İleri ekserji analizi için amaç fonksiyonu değiştirilmiş ekserji verimi ve ekserji yıkım oranı olarak belirlenmiştir. Bu değerler aşağıdaki gibi hesaplanır (Mehrpooya ve ark., 2018) (Anvari ve ark., 2015).

$$\varepsilon_k^{ad} = \frac{E\dot{x}_{P,k}}{E\dot{x}_{F,k} - E\dot{x}_{D,k}^{UN} - E\dot{x}_{D,k}^{AV,EX}} \quad (3.88)$$

$$Y_{D,k}^{*adv} = \frac{E\dot{x}_{D,k}^{AV,EN}}{E\dot{x}_{D,t}} \quad (3.89)$$

3.5. İleri Eksergo-ekonomik Analiz

İleri ekserji analizindeki yaklaşım ekonomik analize de uygulanabilir. Yatırım maliyetleri ve ekserji yıkım maliyetleri de içsel, dışsal, kaçınılabılır ve kaçınılamaz bölümlerine ayrılabilir. Böylelikle sistem performansının iyileştirilmesi için daha kesin bilgilere tasarımcı ulaşabilmektedir.

Öncelikle “k” bileşeninin kaçınılamaz yatırım maliyet değeri (\dot{Z}_k^{UN}) değeri Tablo 3.3’te verilen değerlere göre bulunmuştur. Daha sonra kaçınılabılır (\dot{Z}_k^{AV}), kaçınılamaz iç ($\dot{Z}_k^{UN,EN}$), kaçınılamaz dış ($\dot{Z}_k^{UN,EX}$), kaçınılabılır iç ($\dot{Z}_k^{AV,EN}$) ve kaçınılabılır dış ($\dot{Z}_k^{AV,EX}$) yatırım maliyetleri aşağıdaki denklemler ile bulunmuştur (Petrakopoulou, 2011).

$$\dot{Z}_k^{AV} = \dot{Z}_k - \dot{Z}_k^{UN} \quad (3.90)$$

$$\dot{Z}_k^{UN,EN} = E\dot{x}_{P,k}^{EN} \left(\frac{\dot{Z}}{E\dot{x}_P} \right)_k^{UN} \quad (3.91)$$

$$\dot{Z}_k^{UN,EX} = \dot{Z}_k^{UN} - \dot{Z}_k^{UN,EN} \quad (3.92)$$

$$\dot{Z}_k^{AV,EN} = \dot{Z}_k^{EN} - \dot{Z}_k^{UN,EN} \quad (3.93)$$

$$\dot{Z}_k^{AV,EX} = \dot{Z}_k^{EX} - \dot{Z}_k^{UN,EX} \quad (3.94)$$

Ekserji yıkım maliyetleri ise içsel, dışsal ve kaçınılabılır, kaçınılamaz bölümlerine göre aşağıdaki denklemler ile bulunmuştur (Uysal, 2020).

$$\dot{C}_{D,k}^{EN} = c_S E\dot{x}_{D,k}^{EN} \quad (3.95)$$

$$\dot{C}_{D,k}^{EX} = c_S E\dot{x}_{D,k}^{EX} \quad (3.96)$$

$$\dot{C}_{D,k}^{AV} = c_S E\dot{x}_{D,k}^{AV} \quad (3.97)$$

$$\dot{C}_{D,k}^{UN} = c_S E\dot{x}_{D,k}^{UN} \quad (3.98)$$

$$\dot{C}_{D,k}^{AV,EN} = c_S E\dot{x}_{D,k}^{AV,EN} \quad (3.99)$$

$$\dot{C}_{D,k}^{AV,EX} = c_S E\dot{x}_{D,k}^{AV,EX} \quad (3.100)$$

$$\dot{C}_{D,k}^{UN,EN} = c_S E\dot{x}_{D,k}^{UN,EN} \quad (3.101)$$

$$\dot{C}_{D,k}^{UN,EX} = c_S E\dot{x}_{D,k}^{UN,EX} \quad (3.102)$$

İleri ekserji analizi için amaç fonksiyonu kaçınılabılır içsel eksergo-ekonomik faktör ve toplam maliyet olarak değerlendirilmiştir. Bu değerler aşağıdaki denklemler ile bulunmuştur (Mehrpooya ve ark., 2018):

$$f_k^{AV,EN} = \frac{\dot{z}_k^{AV,EN}}{\dot{C}_{D,k}^{AV,EN} + \dot{z}_k^{AV,EN}} \quad (3.103)$$

$$\dot{C}_{top,k}^{AV,EN} = \dot{C}_{D,k}^{AV,EN} + \dot{z}_k^{AV,EN} \quad (3.104)$$

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

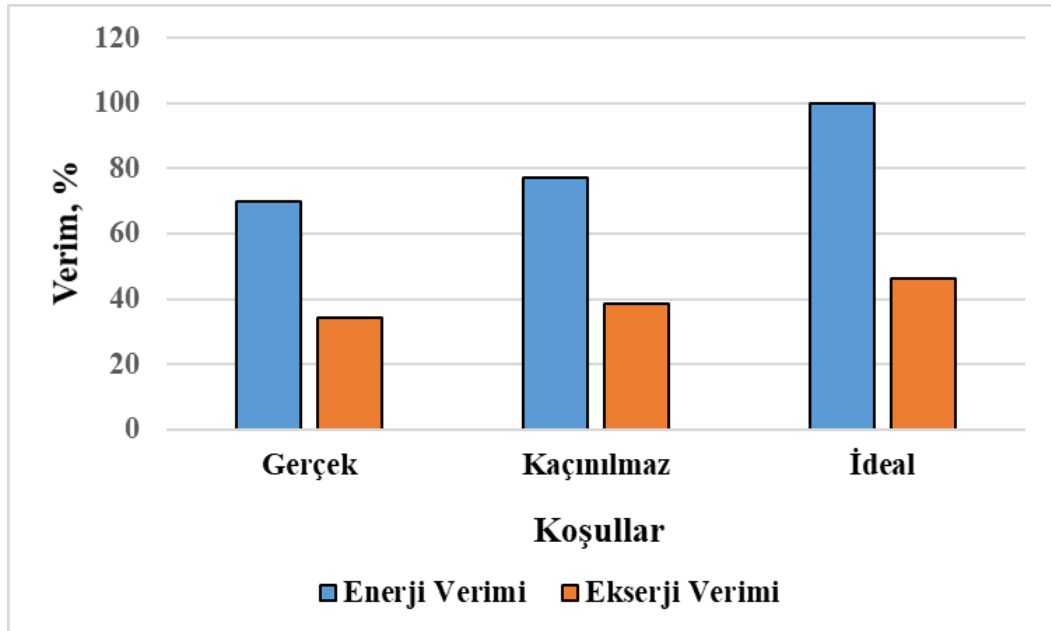
Bu bölümde amaçlanan birleşik güç sisteminin geleneksel ve ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analiz sonuçları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Analiz için bir matematik model geliştirilmiş ve bu modelin çözümü Engineering Equation Solver (EES) programında yapılmıştır. Sistem bileşenlerinin kendisinden ve diğer sistem bileşenleri ile olan ilişkilerinden kaynaklanan ekserji yıkım ve maliyetleri bulunmuştur. Özellikle kaçınılmaz içsel ekserji ve maliyetleri üzerinden geliştirilme potansiyeli olan sistem bileşenleri belirlenmiştir. Geleneksel ekserji ve eksergo-ekonomik analiz ile ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analiz sonuçları kıyaslanmıştır. Amaçlanan sistemin prosesine ait termodinamik veriler Tablo 4.1’de sunulmuştur.

Tablo 4.1. Amaçlanan sistemin proses termodinamik verisi

| Hat no | \dot{m} (kg/s) | T (°C) | P (kPa) | $E\dot{x}^T$ (kW) | $E\dot{x}^M$ (kW) | $E\dot{x}$ (kW) |
|--------|------------------|---------|---------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 1 | 40.66 | -162.00 | 100.00 | 44121.00 | 0.00 | 44121.00 |
| 2 | 40.66 | -158.60 | 8000.00 | 17863.00 | 26708.00 | 44571.00 |
| 3 | 40.66 | 4.80 | 8000.00 | 85.66 | 26708.00 | 26793.66 |
| 4 | 40.66 | 15.01 | 8000.00 | 20.03 | 26708.00 | 26728.03 |
| 5 | 40.66 | -80.77 | 1435.00 | 2363.00 | 16591.00 | 18954.00 |
| 6 | 40.66 | 15.01 | 1435.00 | 16.02 | 16591.00 | 16607.02 |
| 7 | 78.28 | 9.80 | 487.50 | 56.06 | 6691.00 | 6747.06 |
| 8 | 78.28 | 0.88 | 487.50 | 2717.00 | 6691.00 | 9408.00 |
| 9 | 78.28 | 3.00 | 3412.00 | 170.00 | 9662.00 | 9832.00 |
| 10 | 78.28 | 94.61 | 3412.00 | 4209.00 | 9662.00 | 13871.00 |
| 11 | 17.21 | 99.61 | 100.00 | 7771.00 | 0.00 | 7771.00 |
| 12 | 17.21 | 99.61 | 100.00 | 579.20 | 0.00 | 579.20 |
| 13 | 17.21 | 99.67 | 618.20 | 580.00 | 8.95 | 588.95 |
| 14 | 17.21 | 165.00 | 618.20 | 12964.00 | 8.95 | 12972.95 |
| 15 | 58.41 | 20.00 | 100.00 | 10.36 | 0.00 | 10.36 |
| 16 | 58.41 | 20.01 | 300.00 | 10.30 | 11.72 | 22.02 |
| 17 | 58.41 | 15.00 | 300.00 | 41.93 | 11.72 | 53.65 |
| 18 | 429.80 | 20.00 | 100.00 | 76.22 | 0.00 | 76.22 |
| 19 | 429.80 | 20.01 | 300.00 | 75.76 | 86.20 | 161.96 |
| 20 | 429.80 | 15.00 | 300.00 | 308.50 | 86.20 | 394.70 |

Şekil 4.1’de birleşik güç sisteminin gerçek, kaçınılmaz ve ideal koşullardaki enerji ve ekserji verimleri gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere en yüksek enerji ve ekserji verimleri sırası ile ideal ve kaçınılmaz koşullardadır. Gerçek koşullarda verimler sistem bileşenlerindeki tersinmezliklerden kaynaklanmaktadır. Sistem prosesini kaçınılmaz

koşullarda çalıştırmak, sistem verimini arttırmak için daha gerçekçi bir yaklaşım olacaktır. Çünkü kaçınılmaz koşullara sınırı, teknolojik durum koymaktadır. Ama ideal koşullarda sistemi çalıştırmak imkânsızdır.



Şekil 4.1. Amaçlanan sistemin gerçek, kaçınılmaz ve ideal koşullarda enerji ve ekserji verimleri

Tablo 4.2 ve Şekil 4.2’te sistem bileşenlerine ait ileri ekserji sonuçları verilmiştir. Tablo 4.2’e bakıldığında hem geleneksel hem de ileri ekserji analiz sonuçlarına göre PGK en yüksek ekserji yıkım değerlerine sahip olmaktadır. PGK, 46662 kW ile en yüksek ekserji yıkım değerine ve 10808 kW ile en yüksek kaçınılabilir ekserji yıkım değerine sahip olmaktadır. Kaçınılabilir ekserji yıkım değeri yüksek olsa da Şekil 4.2’ye bakıldığında bu değer PGK’nin ekserji yıkımının %23’ü kadarı olduğu anlaşılmaktadır ve ancak bu alanda performans ilerletme potansiyeli vardır. PGK’nin kaçınılabilir ekserji yıkımı %23 olsa bile diğer sistem bileşenlerinin ekserji yıkımlarına göre daha büyük bir değere sahip olduğu için bu sistemin performansındaki iyileştirme sistemin performansını artıracaktır. Ekserji yıkımının geri kalan %77’lik payı kaçınılamaz ekserji yıkım değeridir ve azaltılamaz. Ayrıca %85 içsel ekserji yıkım payı ile bu sistemdeki ekserji yıkımının büyük bir kısmının sistemin kendi içindeki tersinmezliklerden kaynaklandığı anlaşılmaktadır ve sistemin diğer sistem bileşenleri ile olan etkileşiminin ekserji yıkımında baskın olmadığı görülmektedir. Kaçınılabilir ekserji yıkımında bu sistem bileşeninin hem kendi tersinmezliği (%12’lik pay) hem de sistem elemanları ile olan etkileşimi (%11’lik pay) neredeyse aynı etkiye sahiptir. Bu durum PGK’deki ekserji yıkımının büyük bir kısmının kaçınılmaz olduğunu ve geri kalan kaçınılabilir ekserji

yıkımı için de bu sistem bileşenin hem iç veriminde hem de diğer sistem bileşenleri ile olan etkileşiminde iyileştirme yapılarak bu sistem bileşenindeki ve böylelikle bütün sistemdeki ekserji yıkımının azaltılma potansiyelinin olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.2. Sistem bileşenlerinin ileri ekserji analiz sonuçları

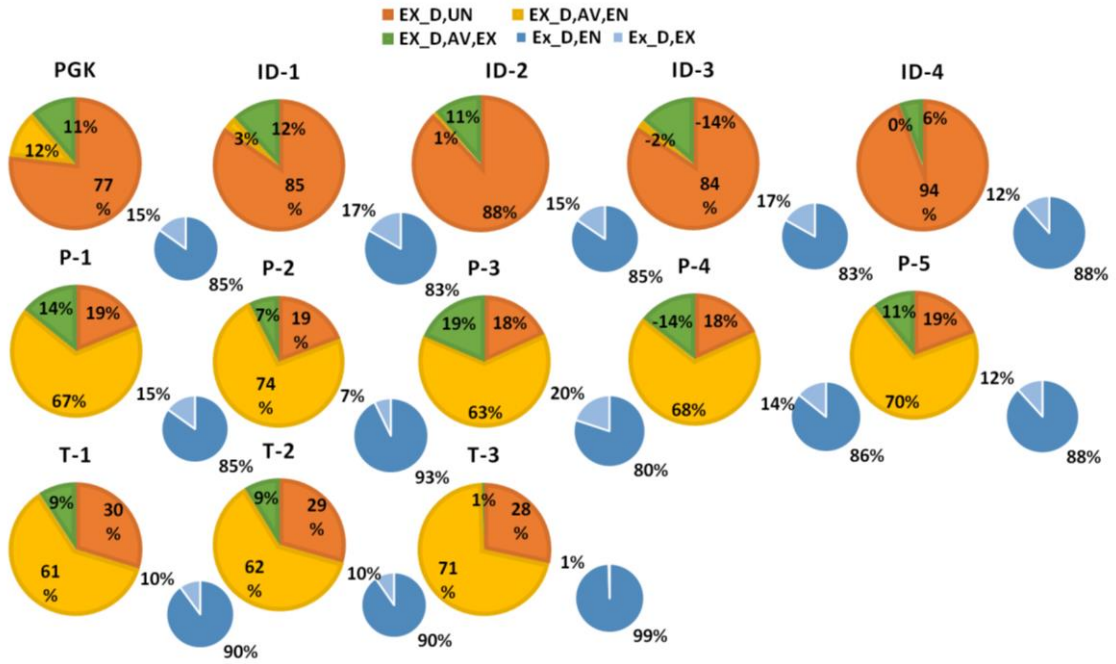
| Bileşen | $E\dot{x}_{D,k}$ (kW) | $E\dot{x}_{D,k}^{EN}$ (kW) | $E\dot{x}_{D,k}^{EX}$ (kW) | $E\dot{x}_{D,k}^{UN}$ (kW) | $E\dot{x}_{D,k}^{AV}$ (kW) |
|--------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| PGK | 46662 | 39619 | 7043 | 35854 | 10808 |
| T-1 | 643.4 | 578.5 | 64.9 | 191.3 | 452.1 |
| ID-1 | 3153 | 2628 | 525 | 2670 | 483 |
| P-1 | 1.86 | 1.580 | 0.28 | 0.349 | 1.51 |
| T-2 | 1130 | 1021.0 | 109.0 | 333 | 798 |
| ID-2 | 15116 | 12783 | 2333 | 13306 | 1810 |
| P-2 | 116.9 | 108.50 | 8.40 | 22.49 | 94.41 |
| P-3 | 494.7 | 395.9 | 98.8 | 90.0 | 404.7 |
| T-3 | 1707 | 1698 | 9 | 484.8 | 1222.2 |
| ID-3 | 34 | 28.260 | 5.7 | 41.75 | -7.75 |
| ID-4 | 2115 | 1870 | 245 | 1994 | 121 |
| P-4 | 2.975 | 3.563 | -0.588 | 0.758 | 2.217 |
| P-5 | 21.89 | 19.320 | 2.570 | 4.227 | 17.663 |
| Genel | 71198.725 | 60754.623 | 10444.102 | 54992.144 | 16206.581 |

Tablo 4.2. Sistem bileşenlerinin ileri ekserji analiz sonuçları (Devam)

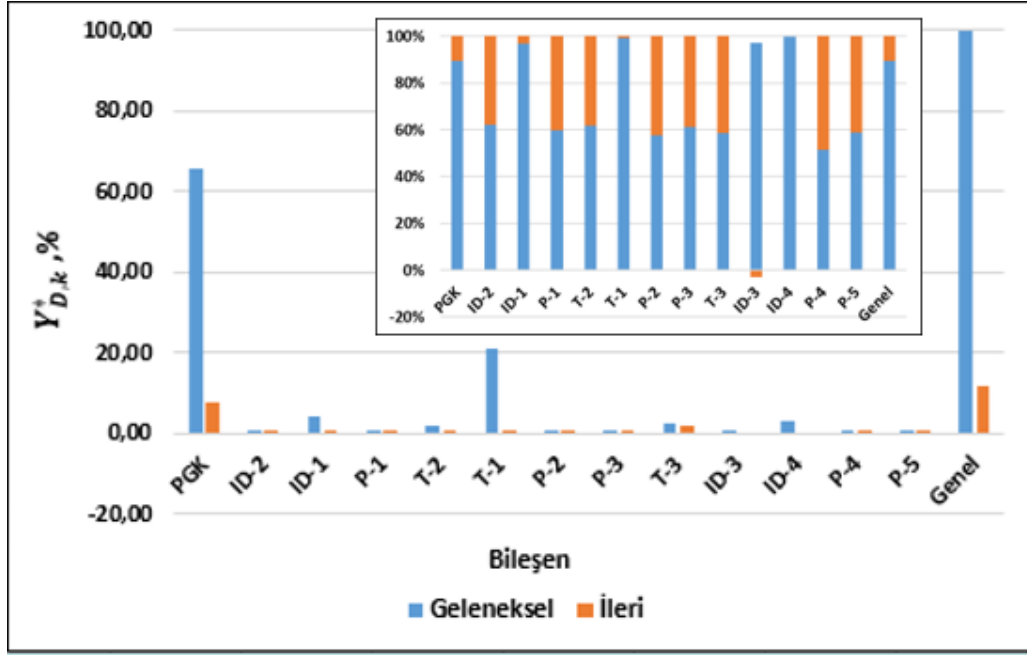
| Bileşen | $E\dot{x}_{D,k}^{UN,EN}$ (kW) | $E\dot{x}_{D,k}^{UN,EX}$ (kW) | $E\dot{x}_{D,k}^{AV,EN}$ (kW) | $E\dot{x}_{D,k}^{AV,EX}$ (kW) |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| PGK | 34125 | 1729 | 5494 | 5314 |
| T-1 | 185.5 | 5.8 | 393 | 59.1 |
| ID-1 | 2522 | 148 | 106 | 377 |
| P-1 | 0.3325 | 0.017 | 1.2475 | 0.2631 |
| T-2 | 322.5 | 10 | 698.5 | 99.0 |
| ID-2 | 12681 | 625 | 102 | 1708 |
| P-2 | 22.65 | -0.16 | 85.85 | 8.56 |
| P-3 | 83.34 | 6.6 | 313 | 92.2 |
| T-3 | 483.5 | 1.3 | 1214.5 | 7.7 |
| ID-3 | 29.25 | 12.50 | -0.99 | -6.76 |
| ID-4 | 1871 | 123 | -1 | 122 |
| P-4 | 0.7511 | 0.007 | 2.8119 | -0.5949 |
| P-5 | 4.058 | 0.169 | 15.2620 | 2.4010 |
| Genel | 52330.882 | 2661.263 | 8423.741 | 7782.839 |

En yüksek kaçınılabilir ekserji yıkımı yüzdelik payına sahip olan bileşenler sırası ile P-3 (% 82'lik pay), P-2 (% 81'lik pay), P-5 (% 81'lik pay) ve P-1 (% 81'lik pay)'dir ve bu sistem bileşenlerinin ekserji yıkımlarının çoğunluğu içseldir. Bu bileşenler iyileştirme potansiyeline sahiptirler. Fakat bu sistem bileşenlerindeki iyileştirme ekserji yıkımları küçük olduğu için sistem performansını fazla etkilemeyecektir. Bu bakış açısıyla hem birleşik sistemin toplam ekserji yıkım miktarına hem de kaçınılabilir ekserji

miktarına göre değerlendirme yapılırsa burada bir orantı kurmak gerekmektedir. Sistem bileşeninin kendisine odaklanabilmek için kaçınılmaz olarak içsel ekserji yıkım değerinin ve sistem bileşeninin ekserji yıkımının toplam ekserji yıkımına göre bir değerlendirmesinin yapılması uygun olacaktır. Şekil 4.3 sistem bileşenlerinin ekserji ve değiştirilmiş ekserji yıkım değerlerini göstermektedir. Bu şekil $Y_{D,k}^*$ ve $Y_{D,k}^{adv}$ arasında dengeli bir yaklaşım ile incelendiğinde performansının iyileştirilmesi ile birleşik sistemin performansını iyileştirecek başlıca sistem bileşenlerinin sırası ile PGK, T-3 ve T-2 olduğu görülmektedir. Dolayısıyla öncelikle bu sistem bileşenlerine odaklanmaktadır. Ekserji yıkım maliyetleri ekserji yıkım değerlerine bağlı olarak bulunduğu için Şekil 4.4'te gösterilen sistem bileşenlerinin ekserji yıkım maliyetlerinin yüzdelik payları Şekil 4.2 ile benzer çıkmıştır. Bu nedenle Tablo 4.3 ve Şekil 4.4 beraber incelendiğinde ekserji yıkım maliyetleri için de yine PGK, T-3 ve T-2 sistem bileşenleri üzerinde odaklanılması gerektiği sonucuna varılmaktadır.



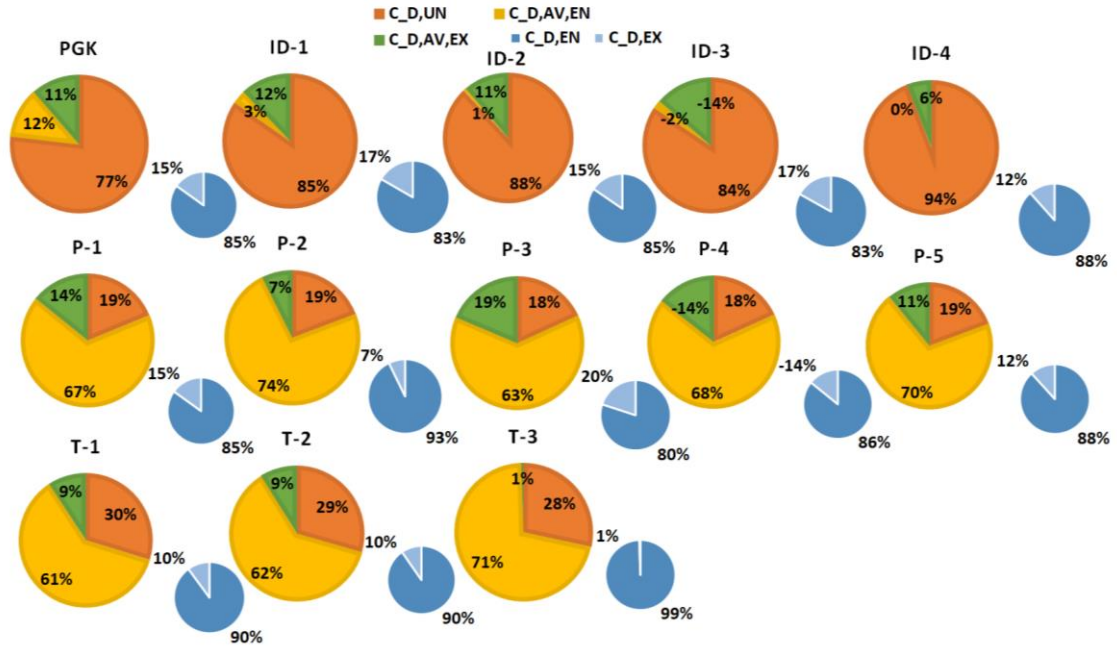
Şekil 4.2. Sistem bileşenleri için ekserji yıkım yüzdelik değerleri



Şekil 4.3. Sistem bileşenlerinin ekserji ve değiştirilmiş ekserji yıkım oranları

Tablo 4.3. Sistem bileşenlerinde ekserji yıkım maliyet değerleri

| Bileşen | $\dot{C}_{D,k}$ (\$/h) | $\dot{C}_{D,k}^{EN}$ (\$/h) | $\dot{C}_{D,k}^{EX}$ (\$/h) | $\dot{C}_{D,k}^{UN}$ (\$/h) | $\dot{C}_{D,k}^{AV}$ (\$/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) |
|--------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| PGK | 345.877 | 293.672 | 52.206 | 265.764 | 80.113 | 252.948 | 12.816 | 40.724 | 39.389 |
| T-1 | 4.769 | 4.288 | 0.481 | 1.418 | 3.351 | 1.375 | 0.043 | 2.913 | 0.438 |
| ID-1 | 23.371 | 19.480 | 3.892 | 19.791 | 3.580 | 18.694 | 1.097 | 0.786 | 2.794 |
| P-1 | 0.014 | 0.012 | 0.002 | 0.003 | 0.011 | 0.002 | 0.000 | 0.009 | 0.002 |
| T-2 | 8.376 | 7.568 | 0.808 | 2.465 | 5.911 | 2.390 | 0.074 | 5.178 | 0.734 |
| ID-2 | 112.046 | 94.753 | 17.293 | 98.629 | 13.416 | 93.997 | 4.633 | 0.756 | 12.660 |
| P-2 | 0.867 | 0.804 | 0.062 | 0.167 | 0.700 | 0.168 | -0.001 | 0.636 | 0.063 |
| P-3 | 3.667 | 2.935 | 0.732 | 0.667 | 3.000 | 0.618 | 0.049 | 2.317 | 0.683 |
| T-3 | 12.653 | 12.586 | 0.067 | 3.594 | 9.059 | 3.584 | 0.010 | 9.002 | 0.057 |
| ID-3 | 0.252 | 0.209 | 0.043 | 0.309 | -0.057 | 0.217 | 0.093 | -0.007 | -0.050 |
| ID-4 | 15.677 | 13.861 | 1.816 | 14.780 | 0.897 | 13.869 | 0.912 | -0.007 | 0.904 |
| P-4 | 0.022 | 0.026 | -0.004 | 0.006 | 0.016 | 0.006 | 0.000 | 0.021 | -0.004 |
| P-5 | 0.162 | 0.143 | 0.019 | 0.031 | 0.131 | 0.030 | 0.001 | 0.113 | 0.018 |
| Genel | 527.753 | 450.338 | 77.416 | 407.624 | 120.130 | 387.897 | 19.726 | 62.440 | 57.690 |



Şekil 4.4. Sistem bileşenleri için ekserji yıkım maliyetlerinin yüzdelik değerleri

Tablo 4.4'te görüldüğü üzere:

- Termal ve mekanik birim ekserji maliyetleri sırası ile 5.614 \$/GJ ve 5.965 \$/GJ olarak bulunmuştur.
- Entropi oluşumunun birim maliyeti 2.059 \$/GJ olarak bulunmuştur.
- T-1, T-2 ve T-3 sistem bileşenlerinden üretilen elektriğin birim maliyeti sırası ile 8.484 \$/GJ, 8.639 \$/GJ ve 9.372 \$/GJ olarak bulunmuştur.

Tablo 4.4. MOPSA metodu için tanımlanan birim maliyet değerleri

| c_{1T} (\$/GJ) | $c_{WT,1}$ (\$/GJ) | c_{3T} (\$/GJ) | c_{4M} (\$/GJ) |
|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| -0.304 | 8.484 | 1.988 | 14.49 |
| $c_{WT,2}$ (\$/GJ) | c_{6T} (\$/GJ) | c_{7M} (\$/GJ) | c_{8M} (\$/GJ) |
| 8.639 | 2.05 | 6.591 | 5.863 |
| $c_{WT,3}$ (\$/GJ) | c_{10T} (\$/GJ) | c_{11T} (\$/GJ) | c_{12M} (\$/GJ) |
| 9.372 | -2.279 | 1.966 | 15.25 |
| c_{13M} (\$/GJ) | c_M (\$/GJ) | c_T (\$/GJ) | c_s (\$/GJ) |
| 13.92 | 5.965 | 5.614 | 2.059 |

Tablo 4.5'te görüldüğü üzere:

- Amaçlanan birleşik sistemin ilk yatırım maliyet akışı 477.164 \$/h olarak bulunmuştur.

- T-1, T-2 ve T-3’de üretilen elektriğin toplam maliyet akımı -530.3 \$/h olarak bulunmuştur.
- P-1, P-2, P-3, P-4 ve P-5’de tüketilen elektriğin toplam maliyet akımı 53.2 \$/h olarak bulunmuştur.
- Birleşik güç sisteminde üretilen elektriğin maliyet akışı -477.15 \$/h olarak bulunmuştur.
- PGK ve ID-2’deki entropi üretiminin maliyet akışı sırası ile -345.9 \$/h ve -112 \$/h olarak bulunmuştur.

Eksi değerler MOPSA metodunda maliyet denge denklemlerinin kuruluş mantığından kaynaklanmaktadır.

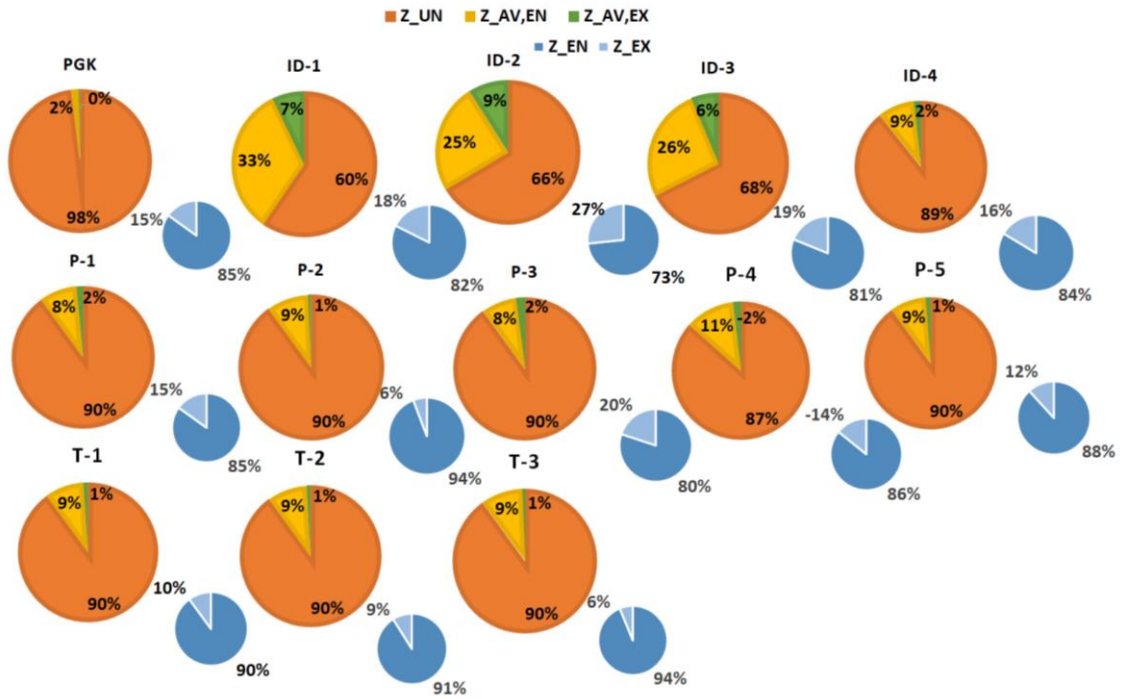
Tablo 4.5. Amaçlanan birleşik güç sisteminin bileşenleri için ekserji türlerinin maliyet akışları

| Bileşen | \dot{C}_T (\$/h) | \dot{C}_M (\$/h) | \dot{C}_{sun} (\$/h) | \dot{C}_{BQ} (\$/h) | \dot{C}_W (\$/h) | \dot{C}_D (\$/h) | \dot{Z} (\$/h) |
|---------------|--------------------|--------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| PGK | 13.550 | 0 | 0 | 0 | 0 | -345.900 | 332.316 |
| T-1 | 105 | 0.1921 | 0 | 0 | -139.2 | -4.769 | 38.844 |
| ID-1 | 22.57 | 0 | 0 | 0 | 0 | -23.37 | 0.801 |
| P-1 | -0.01666 | -0.4666 | 0 | 0 | 0.3552 | -0.01379 | 0.142 |
| T-2 | 83.94 | 63.79 | 0 | 0 | -186.4 | -8.374 | 47.052 |
| ID-2 | 111.6 | 0 | 0 | 0 | 0 | -112 | 0.471 |
| P-2 | 51.48 | -70.49 | 0 | 0 | 16.81 | -0.8661 | 3.059 |
| P-3 | 530.7 | -563.7 | 0 | 0 | 31.86 | -3.666 | 4.781 |
| T-3 | -47.36 | 217.2 | 0 | 0 | -204.7 | -12.65 | 47.448 |
| ID-3 | -0.279 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0.252 | 0.531 |
| ID-4 | 14.97 | 0 | 0 | 0 | 0 | -15.67 | 0.707 |
| P-4 | 0.001282 | -0.6432 | 0 | 0 | 0.4935 | -0.02205 | 0.170 |
| P-5 | 0.009431 | -4.32 | 0 | 0 | 3.631 | -0.1623 | 0.841 |
| Sımr | -886.1 | 358.4 | | | | 527.7 | 0 |
| Toplam | 0 | 0 | 0 | 0 | -477.150 | 0.000 | 477.164 |

Tablo 4.6 ve Şekil 4.5’te sistem bileşenlerine ait ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçları verilmiştir. Tablo 4.6’ya bakıldığında en yüksek kaçınılmaz maliyet akış değerine sahip olan sistem bileşenleri sırası ile PGK (325.670 \$/h), T-3 (42.703 \$/h), T-2 (42.347 \$/h) ve T-1 (34.960 \$/h)’dir. Şekil 4.5’ya bakıldığında birleşik güç sistemindeki bileşen bazında yüzdellik olarak en yüksek kaçınılabılır yatırım maliyet akış değerine sahip olan bileşen ID-1 olmasına rağmen bu sistemdeki maliyet akış değeri oldukça küçüktür.

Tablo 4.6. Sistem bileşenlerine ait ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçları

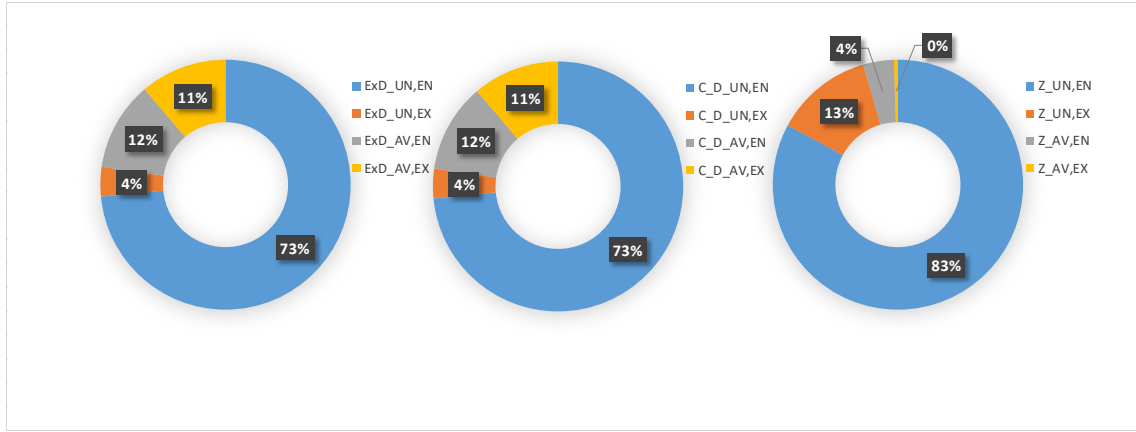
| Bileşen | \dot{Z}_k (\$/h) | \dot{Z}_k^{EN} (\$/h) | \dot{Z}_k^{EX} (\$/h) | \dot{Z}_k^{UN} (\$/h) | \dot{Z}_k^{AV} (\$/h) | $\dot{Z}_k^{UN,EN}$ (\$/h) | $\dot{Z}_k^{UN,EX}$ (\$/h) | $\dot{Z}_k^{AV,EN}$ (\$/h) | $\dot{Z}_k^{AV,EX}$ (\$/h) |
|--------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| PGK | 332.316 | 282.136 | 50.180 | 325.670 | 6.646 | 276.493 | 49.177 | 5.643 | 1.004 |
| T-1 | 38.844 | 34.932 | 3.912 | 34.960 | 3.884 | 31.439 | 3.521 | 3.493 | 0.391 |
| ID-1 | 0.801 | 0.660 | 0.141 | 0.477 | 0.324 | 0.393 | 0.084 | 0.267 | 0.057 |
| P-1 | 0.142 | 0.120 | 0.021 | 0.128 | 0.014 | 0.108 | 0.019 | 0.012 | 0.002 |
| T-2 | 47.052 | 42.837 | 4.215 | 42.347 | 4.705 | 38.553 | 3.794 | 4.284 | 0.422 |
| ID-2 | 0.471 | 0.345 | 0.126 | 0.313 | 0.158 | 0.229 | 0.083 | 0.116 | 0.042 |
| P-2 | 3.059 | 2.882 | 0.177 | 2.753 | 0.306 | 2.594 | 0.159 | 0.288 | 0.018 |
| P-3 | 4.781 | 3.827 | 0.954 | 4.303 | 0.478 | 3.444 | 0.858 | 0.383 | 0.095 |
| T-3 | 47.448 | 44.515 | 2.933 | 42.703 | 4.745 | 40.064 | 2.639 | 4.452 | 0.293 |
| ID-3 | 0.531 | 0.431 | 0.100 | 0.359 | 0.172 | 0.291 | 0.068 | 0.140 | 0.033 |
| ID-4 | 0.707 | 0.591 | 0.116 | 0.631 | 0.076 | 0.528 | 0.104 | 0.063 | 0.012 |
| P-4 | 0.170 | 0.204 | -0.034 | 0.153 | 0.017 | 0.184 | -0.030 | 0.020 | -0.003 |
| P-5 | 0.841 | 0.742 | 0.099 | 0.757 | 0.084 | 0.668 | 0.089 | 0.074 | 0.010 |
| Genel | 477.164 | 414.223 | 62.940 | 455.553 | 21.610 | 394.989 | 60.565 | 19.235 | 2.376 |



Şekil 4.5. Sistem bileşenleri için yatırım maliyet akışlarının yüzdelik değerleri

Birleşik güç sisteminin ekserji ve ekonomik analizinde özellikle kaçınılabilir ekserji değerine yoğunlaşmıştır. Çünkü ekserjinin bu bölümü iyileştirme potansiyelinin bir ölçüsünü göstermektedir. Şekil 4.6'ye bakıldığı zaman amaçlanan birleşik güç sisteminin ekserji yıkımı ve ekserji yıkım maliyetlerinin %23'ünü kaçınılabilir bölümü oluşturmaktadır. Birleşik güç sisteminin ekserji yıkım ve maliyetlerinin yaklaşık olarak

%12 payı kaçınılmaz içsel, %11 payı kaçınılmaz dışsal bölümü oluşturmaktadır. Birleşik güç sisteminin ekserji yıkım ve maliyetlerinin %85'i içsel %15'i dışsal bölümünü oluşturmaktadır. Bu yüzdeler payları her ne kadar sistem bileşenleri arasındaki ilişkinin performansı iyileştirme potansiyelinde etkili olmadığını gösterse de kaçınılmaz paya baktığımızda %23'lik iyileştirme potansiyelinde hem sistem bileşenlerinin iç verimlerinin hem de sistem bileşenleri arasındaki ilişkinin neredeyse eşit derecede etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6. Birleşik güç sisteminin ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analiz sonuçları

Amaçlanan birleşik sistemin yatırım maliyet akışlarının yüzdeler payına bakıldığında %83'ünün kaçınılmaz içsel, %13'ünün kaçınılmaz dışsal olduğu görülmektedir (Şekil 4.6). Bu durumda yatırım maliyet akışı için iyileştirme potansiyelinin %4 sistem bileşenleri ve sistem bileşenlerinin beraber çalışmasındaki uyumu düşünülerek iyileştirilebilir.

Tablo 4.7'ye bakıldığında en yüksek ekserji yıkım oranına sahip bileşenlerin sırası ile ID-4 ve ID-2 olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu sistem bileşenleri ID-4 için % 713.33 ve ID-2 için % 543.90 değeri ile en yüksek göreceli maliyet farkı (r) değerine de sahiptir. Göreceli maliyet farkı yakıtın ekserji maliyetine göre ürünün ekserji maliyetindeki nispi artışın bir açıklamasıdır ve bu iki sistem bileşenindeki ekserji yıkımı yüksek göreceli maliyet farkını açıklamaktadır. ID-2 ve ID-4'deki ekserji yıkımının büyük çoğunluğu kaçınılmazdır ve azaltılamaz. En düşük r değerine sahip sistem bileşeni % 29.76 değeri ile P-2'dir.

Tablo 4.7. Sistem bileşenlerinin geleneksel ekserji ve eksergo-ekonomik analiz sonuçları

| Bileşen | $\dot{E}x_{F,k}$ (kW) | $\dot{E}x_{P,k}$ (kW) | $c_{f,k}$ (\$/GJ) | $c_{p,k}$ (\$/GJ) | $Y_{D,k}$ (%) | r_k (%) |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|---------------|-----------|
| PGK | 59046 | 12384 | 0 | 15.21 | 79.03 | Infinity |
| T-1 | 5202 | 4558 | 5.615 | 8.273 | 12.37 | 47.34 |
| ID-1 | 7192 | 4039 | 1.988 | 3.65 | 43.84 | 83.60 |
| P-1 | 11.63 | 9.77 | 8.484 | 12.91 | 15.99 | 52.17 |
| T-2 | 7124 | 5994 | 5.76 | 8.329 | 15.86 | 44.60 |
| ID-2 | 17919 | 2803 | 2.05 | 13.2 | 84.36 | 543.90 |
| P-2 | 540.6 | 423.8 | 8.639 | 11.21 | 21.62 | 29.76 |
| P-3 | 944.3 | 449.6 | 9.372 | 14.59 | 52.39 | 55.68 |
| T-3 | 7773 | 6067 | 6.071 | 8.823 | 21.96 | 45.33 |
| ID-3 | 95.96 | 61.96 | 2.279 | 5.79 | 35.43 | 154.06 |
| ID-4 | 2439 | 324.5 | 1.966 | 15.99 | 86.72 | 713.33 |
| P-4 | 14.63 | 11.65 | 9.372 | 13.96 | 20.33 | 48.95 |
| P-5 | 107.6 | 85.74 | 9.372 | 12.62 | 20.34 | 34.66 |
| Genel | 108409.720 | 37212.020 | 70.968 | 144.555 | 65.68 | 103.69 |

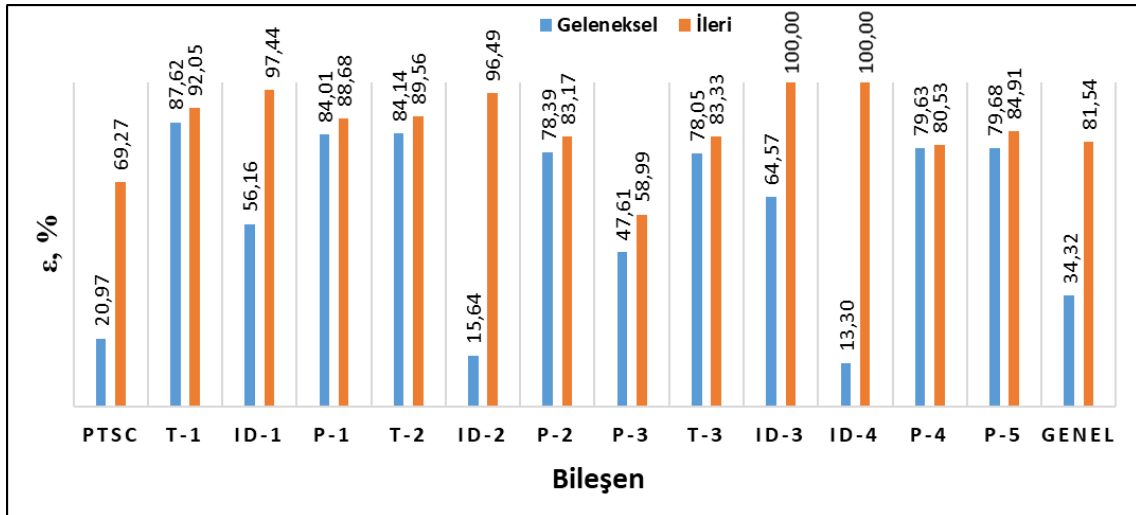
Tablo 4.8. Sistem bileşenleri için geleneksel ve ileri ekserji analiz ve eksergo-ekonomik analiz sonuçları

| Bileşen | Geleneksel | | İleri | |
|--------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------|-----------------------|
| | $(\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k})$ (\$/h) | $(\dot{Z}_k^{AV,EN} + \dot{C}_{D,k}^{AV,EN})$ (\$/h) | ϵ_k (%) | ϵ_k^{ad} (%) |
| PGK | 678.193 | 46.366 | 20.97 | 69.27 |
| T-1 | 43.613 | 6.406 | 87.62 | 92.05 |
| ID-1 | 24.172 | 1.053 | 56.16 | 97.44 |
| P-1 | 0.156 | 0.021 | 84.01 | 88.68 |
| T-2 | 55.428 | 9.461 | 84.14 | 89.56 |
| ID-2 | 112.517 | 0.872 | 15.64 | 96.49 |
| P-2 | 3.926 | 0.925 | 78.39 | 83.17 |
| P-3 | 8.448 | 2.700 | 47.61 | 58.99 |
| T-3 | 60.101 | 13.454 | 78.05 | 83.33 |
| ID-3 | 0.783 | 0.133 | 64.57 | 100 |
| ID-4 | 16.384 | 0.056 | 13.30 | 100 |
| P-4 | 0.192 | 0.041 | 79.63 | 80.53 |
| P-5 | 1.003 | 0.187 | 79.68 | 84.91 |
| Genel | 1004.917 | 81.675 | 34.32 | 81.54 |

Tablo 4.8. Sistem bileşenleri için geleneksel ve ileri ekserji analiz ve eksergo-ekonomik analiz sonuçları (Devam)

| Bileşen | Geleneksel | İleri | Geleneksel | İleri |
|--------------|-----------------|---------------------|------------|-------------------|
| | $Y_{D,k}^*$ (%) | $Y_{D,k}^{adv}$ (%) | f_k (%) | $f_k^{AV,EN}$ (%) |
| PGK | 65.54 | 7.72 | 49.00 | 12.17 |
| T-1 | 0.90 | 0.55 | 89.06 | 54.53 |
| ID-1 | 4.43 | 0.15 | 3.31 | 25.36 |
| P-1 | 0.00 | 0.00 | 91.14 | 56.57 |
| T-2 | 1.59 | 0.98 | 84.89 | 45.28 |
| ID-2 | 21.23 | 0.14 | 0.42 | 13.31 |
| P-2 | 0.16 | 0.12 | 77.93 | 31.17 |
| P-3 | 0.69 | 0.44 | 56.59 | 14.18 |
| T-3 | 2.40 | 1.71 | 78.95 | 33.09 |
| ID-3 | 0.05 | 0.00 | 67.81 | 100 |
| ID-4 | 2.97 | 0.00 | 4.32 | 100 |
| P-4 | 0.00 | 0.00 | 88.54 | 49.47 |
| P-5 | 0.03 | 0.02 | 83.83 | 39.61 |
| Genel | 100.00 | 11.83 | 47.48 | 23.55 |

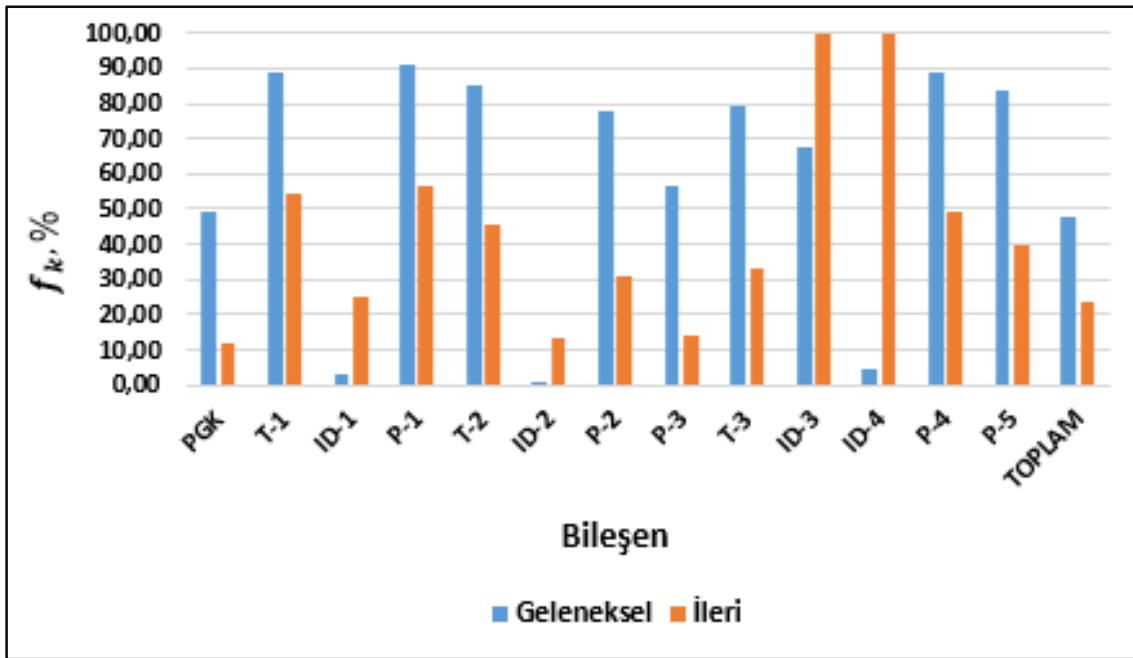
Tablo 4.8 geleneksel ve ileri ekserji analizi ile geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçlarını karşılaştırmak için anahtar parametreleri sunmaktadır. Tablo 4.8'e bakıldığı zaman en yüksek yatırım maliyet akışı ve ekserji yıkım maliyetlerinin toplamının hem geleneksel hem de ileri analiz yaklaşımında PGK bileşeni olduğu görülür. Fakat bu değerler toplamı için ikinci en yüksek değer geleneksel yaklaşımda ID-2 çıkarken ileri yaklaşımda T-3 çıkmaktadır. PGK ve T-3'deki yatırım maliyet akışlarının çoğu kaçınılmazdır bu durumda ekserji yıkım maliyet değerlerinin azaltılması için bu iki bileşene odaklanması gerekmektedir.



Şekil 4.7. Sistem bileşenlerinin geleneksel ve ileri ekserji analizine göre ekserji verimleri

Şekil 4.7’de sistem bileşenlerinin ekserji verimleri geleneksel ve ileri ekserji analizine göre gösterilmektedir. Geleneksel ekserji analizine göre en yüksek ekserji verimine sahip olan iki sistem bileşeni sırası ile % 87.62 ile T-1 ve % 84.14 ile T-2’dir. İleri ekserji analizine göre ise %100 ile ID-4 ve % 100 ile ID-3’tür. Geleneksel ve ileri ekserji analizinde en düşük ekserji verimine sahip olan bileşen ise sırası ile % 13.30 ile ID-4 ve % 58.99 ile P-3’tür. Birleşik sistemin geleneksel ekserji verimi % 34.32 ileri ekserji verimi ise %81.54’dür. Bu durum müdahale edemediğimiz kaçınılmaz ekserji alanını düşündüğümüzde sistemin performansının ortalamanın üstünde olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.8, sistem bileşenlerinin geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analizine göre eksergo-ekonomik faktörlerini göstermektedir. Eksergo-ekonomik faktör sistemin yatırım maliyeti ile ekserji yıkım maliyetini değerlendirmek için bir yaklaşımdır. Şekil 4.8’a bakıldığı zaman geleneksel eksergo-ekonomik analiz için en yüksek ve en düşük f değerlerine sahip bileşenlerin sırası ile % 91.14 ile P-1 ve % 0.42 ile ID-2 olduğu görülmektedir. İleri eksergo-ekonomik analiz için ise en yüksek ve en düşük f değerlerine sahip bileşenler, sırası ile % 100 ile ID-3, ID-4 ve % 12.17 ile PSG’dır.



Şekil 4.8. Sistem bileşenlerinin geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analizine göre eksergo-ekonomik faktörleri

Geleneksel ekserji analizine göre PGK, ID-1, ID-2 ve ID-4 dışındaki sistem bileşenlerinin f değerleri % 50'nin üstündedir ve bu sistem bileşenlerinin yatırım maliyetleri azaltılmalıdır. PGK, ID-1, ID-2 ve ID-4'ün de proses verimleri ve performansları artırılarak ekserji yıkım değerleri azaltılmalıdır.

İleri ekserji analizine göre T-1, P-1, ID-3 ve ID-4 sistem bileşenlerinin f değerleri % 50'nin üstündedir ve bu sistem bileşenlerinin yatırım maliyetleri azaltılmalıdır. Geri kalan sistem bileşenlerinin ise ekserji yıkım maliyetleri, performansları artırılarak azaltılmalıdır.

Amaçlanan birleşik sistemin geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik faktör değerleri sırası ile % 47.48 ve % 23.55'dir. Bu değer, ileri eksergo-ekonomik analize göre sistem bileşenlerindeki ekserji yıkım maliyet değerlerinin daha baskın olduğunu göstermektedir.

4.1. Model Doğrulama

Bu çalışmada LNG'nin soğuk enerjisini kullanan yeni bir birleşik güç sistemi önerilmiştir. Literatürde bu yeni sistemi karşılaştırmak için benzer bir sistem bulmak zordur. Bu nedenle amaçlanan birleşik güç sisteminin alt çevrimlerine benzer literatürdeki çevrimlerle doğrulama çalışması yapılmıştır. Tablo 4.9 ve 4.10'a bakıldığı

zaman referans modellerle [[39], [52]] çalışmamızın sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 4.9. Bu çalışmadaki model ile referans çalışmanın PGK için karşılaştırılması

| Parametre | Data tipi | Modelimiz | Referans model (Baghernejad ve Yaghoubi, 2010) | Fark (%) |
|--------------------------|-----------|---------------------|------------------------------------------------|----------|
| Çalışma akışkanı | Girdi | Therminol VP-1 | Therminol VP-1 | |
| Kolektör giriş sıcaklığı | Girdi | $T_{13}=572.15$ [K] | $T_{31}=572.15$ [K] | |
| Açıklık uzunluğu | Girdi | $a=5.76$ [m] | $a=5.76$ [m] | |
| Kolektör uzunluğu | Girdi | $L=99$ [m] | $L=99$ [m] | |
| Kolektör verimi | Girdi | $\eta=45.4$ % | $\eta=45.4$ % | |
| Kolektör sayısı | Girdi | $N=252$ | $N=252$ | |
| Kolektör çıkış sıcaklığı | Çıktı | $T_{14}=670.10$ [K] | $T_{32}=666.15$ [K] | 0.59 |

Tablo 4.10. Bu çalışmadaki model ile Rankine tipi çevrim (RTC) ve Doğrudan Genişleme çevrimi (DGÇ) için referans çalışmanın karşılaştırılması

| Parametre | Data tipi | Modelimiz | Referans model (Ferreira ve ark., 2017) | Fark (%) |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------|-----------------------------------------|----------|
| Çalışma akışkanı | Girdi | Propene | Propene | |
| LNG pompa giriş basıncı | Girdi | $P_1=101.4$ [kPa] | $P_{ng1}=101.4$ [kPa] | |
| LNG pompa giriş sıcaklığı | Girdi | $T_1=-162$ [°C] | $T_{ng1}=-162$ [°C] | |
| LNG pompa çıkış basıncı | Girdi | $P_2=14645.314$ [kPa] | $P_{ng2}=14645.314$ [kPa] | |
| LNG rezervuar çıkış basıncı | Girdi | $P_6=8200$ [kPa] | $P_{ng6}=8200$ [kPa] | |
| LNG rezervuar çıkış sıcaklığı | Girdi | $T_6=10$ [°C] | $T_{ng6}=10$ [°C] | |
| DGÇ türbin giriş sıcaklığı | Girdi | $T_4=11$ [°C] | $T_{ng4}=11$ [°C] | |
| ORÇ türbin giriş sıcaklığı | Girdi | $T_{10}=11$ [°C] | $T_3=11$ [°C] | |
| ORÇ pompa çıkış basıncı | Girdi | $P_9=842.444$ [kPa] | $P_2=842.444$ [kPa] | |
| ORÇ türbin çıkış basıncı | Girdi | $P_7=100.684$ [kPa] | $P_4=100.684$ [kPa] | |
| Deniz suyu ısı değiştiricisi çıkış sıcaklığı | Girdi | $T_{17}=T_{20}=8$ [°C] | $T_{sw2}=8$ [°C] | |
| Pompa verimi | Girdi | $\eta_p=70$ [%] | $\eta_{pu}=70$ [%] | |
| Türbin verimi | Girdi | $\eta_T=80$ [%] | $\eta_{tu}=80$ [%] | |
| Deniz suyu pompa basınç farkı | Girdi | $\Delta P=5.3$ [kPa] | $\Delta P=5.3$ [kPa] | |
| Isı değiştiricisi basınç kaybı | Girdi | 5 [%] | 5 [%] | |
| Çalışma akışkanları arasındaki min. sıcaklık farkı | Girdi | $\Delta T=5$ [°C] | $\Delta T=5$ [°C] | |
| Üniter bir NG kütle akışı için propen RTC + DGÇ en yüksek net güç | Çıktı | $w_{net}=53.04$ [kJ/kg _{ng}] | $w_{net}=53.03$ [kJ/kg _{ng}] | 0.02 |
| Kütle akış oranı | Çıktı | $\dot{m}_{ds1}/\dot{m}_{CH4}=8.67$ | $\dot{m}_{sw1}/\dot{m}_{ng}=8.67$ | 0 |
| Kütle akış oranı | Çıktı | $\dot{m}_{ds2}/\dot{m}_{CH4}=2.65$ | $\dot{m}_{sw2}/\dot{m}_{ng}=2.65$ | 0 |
| Kütle akış oranı | Çıktı | $\dot{m}_{ORC}/\dot{m}_{CH4}=0.922$ | $\dot{m}_{wf}/\dot{m}_{ng}=0.922$ | 0 |

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada LNG'nin soğuk enerjisini kullanan bir birleşik güç sistemi tasarlanmıştır. Bu sistemin geleneksel-ileri ekserji analizleri ve geleneksel-ileri eksergo-ekonomik analizleri yapılmıştır. Eksergo-ekonomik analiz için MOPSA metodu kullanılmıştır. LNG'nin soğuk enerjisini kullanan birleşik sistem için literatürde MOPSA metodunu kullanarak ileri ekserji analizinin yapıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışmada, ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analiz sonuçlarının sistem bileşenlerinin iyileştirme performansı hakkında daha detaylı bilgi verdiği ortaya çıkmıştır. Çalışmanın ana sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Birleşik güç sisteminin ekserji yıkımı ve ekserji yıkım maliyetlerinin % 23'ünü kaçınılabilir bölümü oluşturmaktadır. Bu bölüm, birleşik sistemin performansını iyileştirme potansiyelinin bir ölçüsüdür. Birleşik sistemin bileşenlerinin iç verimleri iyileştirilerek ekserji yıkım maliyetlerinde %12 ve sistem bileşenleri arasındaki etkileşimin optimizasyonu ile ekserji yıkım maliyeti %11 oranında azaltılabilmektedir.
- Birleşik sistemin yatırım maliyet akışının %4'ü kaçınılabilir bölümdür. Bu yüzdellik pay sistem bileşenlerindeki yatırım maliyet akışlarındaki iyileştirme potansiyelini göstermektedir.
- Hem geleneksel hem de ileri ekserji analizinde en fazla ekserji yıkım ve maliyeti PGK bileşeninde oluşmuştur.
- Sistem bileşenlerinin $Y_{D,k}^*$ ve $Y_{D,k}^{adv}$ değerleri incelendiğinde, birleşik sistemin performansını iyileştirme potansiyeline sahip en etkili başlıca sistem bileşenleri sırası ile PGK, T-3 ve T-2 olduğu görülmektedir.

5.2. Öneriler

Çalışma, amaçlanan birleşik sistem için bir iyileştirme potansiyelinin olduğunu ortaya koymuştur. İleri ekserji ve eksergo-ekonomik analizinin bir sonraki adımı bu birleşik sistemin performansını etkileyen anahtar parametreleri belirlemek ve çok amaçlı bir optimizasyon ile birleşik sistemin performansını artırmak olarak önerilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Abadi, M. J., Hooshmand, P., Khezri, B., & Radmanesh, A. R. (2014). Investigation of using different fluids for using in gas turbine-Rankine cycle. *Indian Journal of Scientific Research*, 1(2), 74-81.
- Ahmadi, M. H., Mehrpooya, M., Abbasi, S., Pourfayaz, F., & Bruno, J. C. (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, 185-196.
- Anvari, S., Saray, R. K., & Bahlouli, K. (2015). Conventional and advanced exergetic and exergoeconomic analyses applied to a tri-generation cycle for heat, cold and power production. *Energy*, 91, 925-939.
- Asgari, S., Noorpoor, A. R., & Boyaghchi, F. A. (2017). Parametric assessment and multi-objective optimization of an internal auto-cascade refrigeration cycle based on advanced exergy and exergoeconomic concepts. *Energy*, 125, 576-590.
- Ashouri, M., Ahmadi, M. H., Pourkiaei, S. M., Astarai, F. R., Ghasempour, R., Ming, T., & Hemati, J. H. (2018). Exergy and exergo-economic analysis and optimization of a solar double pressure organic Rankine cycle. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 72-86.
- Atienza-Márquez, A., Bruno, J. C., Akisawa, A., Nakayama, M., & Coronas, A. (2019a). Fluids selection and performance analysis of a polygeneration plant with exergy recovery from LNG-regasification. *Energy*, 176, 1020-1036.
- Atienza-Márquez, A., Bruno, J. C., Akisawa, A., & Coronas, A. (2019b). Performance analysis of a combined cold and power (CCP) system with exergy recovery from LNG-regasification. *Energy*, 183, 448-461.
- Ayou, D. S., & Evely, V. (2020). Energy, exergy and exergoeconomic analysis of an ultra low-grade heat-driven ammonia-water combined absorption power-cooling cycle for district space cooling, sub-zero refrigeration, power and LNG regasification. *Energy Conversion and Management*, 213, 112790.
- Baghernejad, A., & Yaghoubi, M. (2010). Exergy analysis of an integrated solar combined cycle system. *Renewable energy*, 35(10), 2157-2164.
- Bao, J., Lin, Y., Zhang, R., Zhang, N., & He, G. (2017). Effects of stage number of condensing process on the power generation systems for LNG cold energy recovery. *Applied Thermal Engineering*, 126, 566-582.
- Boyaghchi, F. A., & Sabaghian, M. (2016). Advanced exergy and exergoeconomic analyses of Kalina cycle integrated with parabolic-trough solar collectors. *Scientia Iranica*, 23(5), 2247-2260.
- Cao, Y., Rad, H. N., Jamali, D. H., Hashemian, N., & Ghasemi, A. (2020). A novel multi-objective spiral optimization algorithm for an innovative solar/biomass-based

- multi-generation energy system: 3E analyses, and optimization algorithms comparison. *Energy Conversion and Management*, 219, 112961.
- Choi, I. H., Lee, S., Seo, Y., & Chang, D. (2013). Analysis and optimization of cascade Rankine cycle for liquefied natural gas cold energy recovery. *Energy*, 61, 179-195.
- Deng, S., Jin, H., Cai, R., & Lin, R. (2004). Novel cogeneration power system with liquefied natural gas (LNG) cryogenic exergy utilization. *Energy*, 29(4), 497-512.
- Ersoy, H. K., & Demirpolat, S. O. (2009). Using liquefied natural gas cold energy for power generation: case study for Marmara Ereğlisi receiving terminal. *Journal of the Energy Institute*, 82(1), 11-18.
- Emadi, M. A., Chitgar, N., Oyewunmi, O. A., & Markides, C. N. (2020). Working-fluid selection and thermoeconomic optimisation of a combined cycle cogeneration dual-loop organic Rankine cycle (ORC) system for solid oxide fuel cell (SOFC) waste-heat recovery. *Applied Energy*, 261, 114384.
- Ferreira PA, Catarino I, Vaz D. (2017). Thermodynamic analysis for working fluids comparison in Rankine-type cycles exploiting the cryogenic exergy in Liquefied Natural Gas (LNG) regasification. *Appl Therm Eng.*, 121: 887-896.
- Ghaebi, H., Parikhani, T., & Rostamzadeh, H. (2017). Energy, exergy and thermoeconomic analysis of a novel combined cooling and power system using low-temperature heat source and LNG cold energy recovery. *Energy conversion and management*, 150, 678-692.
- Ghaebi, H., Parikhani, T., & Rostamzadeh, H. (2018). A novel trigeneration system using geothermal heat source and liquefied natural gas cold energy recovery: Energy, exergy and exergoeconomic analysis. *Renewable Energy*, 119, 513-527.
- Ghorbani, B., Ebrahimi, A., Rooholamini, S., & Ziabasharhagh, M. (2020a). Pinch and exergy evaluation of Kalina/Rankine/gas/steam combined power cycles for tri-generation of power, cooling and hot water using liquefied natural gas regasification. *Energy Conversion and Management*, 223, 113328.
- Ghorbani, B., Mahyari, K. B., Mehrpooya, M., & Hamed, M. H. (2020b). Introducing a hybrid renewable energy system for production of power and fresh water using parabolic trough solar collectors and LNG cold energy recovery. *Renewable Energy*, 148, 1227-1243.
- Ghorbani, B., Javadi, Z., Zendehboudi, S., & Amidpour, M. (2020c). Energy, exergy, and economic analyses of a new integrated system for generation of power and liquid fuels using liquefied natural gas regasification and solar collectors. *Energy Conversion and Management*, 219, 112915.
- Habibi, H., Chitsaz, A., Javaherdeh, K., Zoghi, M., & Ayazpour, M. (2018a). Thermoeconomic analysis and optimization of a solar-driven ammonia-water regenerative Rankine cycle and LNG cold energy. *Energy*, 149, 147-160.

- Habibi, H., Zoghi, M., Chitsaz, A., Javaherdeh, K., & Ayazpour, M. (2018b). Thermo-economic analysis and optimization of combined PERC-ORC-LNG power system for diesel engine waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 173, 613-625.
- Kanbur, B. B., Xiang, L., Dubey, S., Choo, F. H., & Duan, F. (2017a). A micro cogeneration system with LNG cold utilization-part 1: energetic, economic and environmental analyses. *Energy Procedia*, 105, 1902-1909.
- Kanbur, B. B., Xiang, L., Dubey, S., Hoong, C. F., & Duan, F. (2017b). A micro cogeneration system with LNG cold utilization-part 2: exergy analyses. *Energy Procedia*, 105, 1910-1917.
- Kanbur, B. B., Xiang, L., Dubey, S., Choo, F. H., & Duan, F. (2019). Thermo-economic analysis and optimization of the small scale power generation and carbon dioxide capture system from liquefied natural gas. *Energy Conversion and Management*, 181, 507-518.
- Khaljani, M., Saray, R. K., & Bahlouli, K. (2015). Comprehensive analysis of energy, exergy and exergo-economic of cogeneration of heat and power in a combined gas turbine and organic Rankine cycle. *Energy Conversion and Management*, 97, 154-165.
- Kwak, H. Y., Kim, D. J., & Jeon, J. S. (2003). Exergetic and thermo-economic analyses of power plants. *Energy*, 28(4), 343-360.
- Li, C., Liu, J., Zheng, S., Chen, X., Li, J., & Zeng, Z. (2019). Performance analysis of an improved power generation system utilizing the cold energy of LNG and solar energy. *Applied Thermal Engineering*, 159, 113937.
- Li, Y., Liu, Y., Zhang, G., & Yang, Y. (2020). Thermodynamic analysis of a novel combined cooling and power system utilizing liquefied natural gas (LNG) cryogenic energy and low-temperature waste heat. *Energy*, 117479.
- Liang, J. (2013). *Chemical Modeling for Air Resources: Fundamentals, Applications, and Corroborative Analysis*. Academic Press.
- Liu, H., & You, L. (1999). Characteristics and applications of the cold heat exergy of liquefied natural gas. *Energy conversion and management*, 40(14), 1515-1525.
- Liu, Y., Han, J., & You, H. (2019). Performance analysis of a CCHP system based on SOFC/GT/CO₂ cycle and ORC with LNG cold energy utilization. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(56), 29700-29710.
- Mehrpooya, M., Kalhorzadeh, M., & Chahartaghi, M. (2016a). Investigation of novel integrated air separation processes, cold energy recovery of liquefied natural gas and carbon dioxide power cycle. *Journal of cleaner production*, 113, 411-425.

- Mehrpooya, M., Sharifzadeh, M. M. M., & Rosen, M. A. (2016b). Energy and exergy analyses of a novel power cycle using the cold of LNG (liquefied natural gas) and low-temperature solar energy. *Energy*, 95, 324-345.
- Mehrpooya, M., Ashouri, M., & Mohammadi, A. (2017). Thermo-economic analysis and optimization of a regenerative two-stage organic Rankine cycle coupled with liquefied natural gas and solar energy. *Energy*, 126, 899-914.
- Mehrpooya, M., Ansarinasab, H., Sharifzadeh, M. M. M., & Rosen, M. A. (2018). Conventional and advanced exergoeconomic assessments of a new air separation unit integrated with a carbon dioxide electrical power cycle and a liquefied natural gas regasification unit. *Energy Conversion and Management*, 163, 151-168.
- Morosuk, T., & Tsatsaronis, G. (2011). Comparative evaluation of LNG-based cogeneration systems using advanced exergetic analysis. *Energy*, 36(6), 3771-3778.
- Morrone, P., Algieri, A., & Castiglione, T. (2019). Hybridisation of biomass and concentrated solar power systems in transcritical organic Rankine cycles: A micro combined heat and power application. *Energy Conversion and Management*, 180, 757-768.
- Mosaffa, A. H., Mokarram, N. H., & Farshi, L. G. (2017). Thermo-economic analysis of combined different ORCs geothermal power plants and LNG cold energy. *Geothermics*, 65, 113-125.
- Nami, H., Mahmoudi, S. M. S., & Nemati, A. (2017a). Exergy, economic and environmental impact assessment and optimization of a novel cogeneration system including a gas turbine, a supercritical CO₂ and an organic Rankine cycle (GT-HRSG/SCO₂). *Applied Thermal Engineering*, 110, 1315-1330.
- Nami, H., Nemati, A., & Fard, F. J. (2017b). Conventional and advanced exergy analyses of a geothermal driven dual fluid organic Rankine cycle (ORC). *Applied Thermal Engineering*, 122, 59-70.
- Oyekale, J., Petrollese, M., & Cau, G. (2020). Modified auxiliary exergy costing in advanced exergoeconomic analysis applied to a hybrid solar-biomass organic Rankine cycle plant. *Applied Energy*, 268, 114888.
- Ozen, D. N., & Uçar, İ. (2020). Energy, exergy, and exergo-economic analysis of a novel combined power system using the cold energy of liquefied natural gas (LNG). *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 39(4), e13377.
- Ozen, D. N., Uysal, C., & Balli, O. (2020). THERMOECONOMIC ANALYSIS OF T56 TURBOPROP ENGINE UNDER DIFFERENT LOAD CONDITIONS. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 40(2), 251-265.
- Pan, Z., Zhang, L., Zhang, Z., Shang, L., & Chen, S. (2017). Thermodynamic analysis of KCS/ORC integrated power generation system with LNG cold energy exploitation and CO₂ capture. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 46, 188-198.

- Qu, Z. G., Bai, Y. H., & Pu, L. (2015). One-dimensional numerical study of thermal performance of an organic Rankine cycle system using liquefied natural gas as a cold source for cold energy recovery. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 26, 1399-1413.
- Shi, X., & Che, D. (2009). A combined power cycle utilizing low-temperature waste heat and LNG cold energy. *Energy conversion and management*, 50(3), 567-575.
- Su, R., Yu, Z., Xia, L., & Sun, J. (2020). Performance analysis and multi-objective optimization of an integrated gas turbine/supercritical CO₂ recompression/transcritical CO₂ cogeneration system using liquefied natural gas cold energy. *Energy Conversion and Management*, 220, 113136.
- Tesch, S., Morosuk, T., & Tsatsaronis, G. (2016). Advanced exergy analysis applied to the process of regasification of LNG (liquefied natural gas) integrated into an air separation process. *Energy*, 117, 550-561.
- Tian, Z., Zeng, W., Gu, B., Zhang, Y., & Yuan, X. (2020). Energy, exergy, and economic (3E) analysis of an organic Rankine cycle using zeotropic mixtures based on marine engine waste heat and LNG cold energy. *Energy Conversion and Management*, 113657.
- Uysal, C., Kurt, H., & Kwak, H. Y. (2017). Exergetic and thermoeconomic analyses of a coal-fired power plant. *International Journal of Thermal Sciences*, 117, 106-120.
- Uysal, C. (2020). A new approach to advanced exergoeconomic analysis: The unit cost of entropy generation. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 39(1), 13297.
- Wang, J., Yan, Z., Wang, M., & Dai, Y. (2013). Thermodynamic analysis and optimization of an ammonia-water power system with LNG (liquefied natural gas) as its heat sink. *Energy*, 50, 513-522.
- Wang, X., Zhao, L., Zhang, L., Zhang, M., & Dong, H. (2019). A novel combined system for LNG cold energy utilization to capture carbon dioxide in the flue gas from the magnesite processing industry. *Energy*, 187, 115963.
- Xia, G., Sun, Q., Cao, X., Wang, J., Yu, Y., & Wang, L. (2014). Thermodynamic analysis and optimization of a solar-powered transcritical CO₂ (carbon dioxide) power cycle for reverse osmosis desalination based on the recovery of cryogenic energy of LNG (liquefied natural gas). *Energy*, 66, 643-653.
- Xue, F., Chen, Y., & Ju, Y. (2017). Design and optimization of a novel cryogenic Rankine power generation system employing binary and ternary mixtures as working fluids based on the cold exergy utilization of liquefied natural gas (LNG). *Energy*, 138, 706-720.
- Yang, X., Zhao, H., & Hou, Q. (2020). Proposal and thermodynamic performance study of a novel LNG-fueled SOFC-HAT-CCHP system with near-zero CO₂ emissions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(38), 19691-19706.

- Yargholi, R., Kariman, H., Hoseinzadeh, S., Bidi, M., & Naseri, A. (2020). Modeling and advanced exergy analysis of integrated reverse osmosis desalination with geothermal energy. *Water Supply*, 20(3), 984-996.
- Yu, G., Jia, S., & Dai, B. (2018). Review on recent liquefied natural gas cold energy utilization in power generation cycles. *Advances in Geo-energy research*, 2(1), 86-102.
- Yuanwei, L., Hongchang, Y., & Chongfang, M. (2011, January). Analysis and optimization of the power cycle based on the cold energy of liquefied natural gas. In *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation* (Vol. 1, pp. 455-458). IEEE.
- Zhang, Y., Liang, T., Yang, C., Zhang, X., & Yang, K. (2020). Advanced exergy analysis of an integrated energy storage system based on transcritical CO₂ energy storage and Organic Rankine Cycle. *Energy Conversion and Management*, 216, 112938.