

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

**GAZ TAHRİKLİ ISI POMPALI BİR KURUTMA SİSTEMİNİN
İLERİ EKSERJİ VE EKSERGOEKONOMİK ANALİZ
YÖNTEMLERİ KULLANILARAK PERFORMANSININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Ayşegül GÜNGÖR ÇELİK

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hüseyin GÜNERHAN

İkinci Danışmanı: Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu: 625.04.00

Sunuş Tarihi: 22.12.2014

Bornova-İZMİR

2014

Ayşegül GÜNGÖR ÇELİK tarafından DOKTORA TEZİ olarak sunulan “Gaz Tahrikli Isı Pompalı Bir Kurutma Sisteminin İleri Ekserji ve Eksergoekonomik Analiz Yöntemleri Kullanılarak Performansının Değerlendirilmesi ” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesinin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 22.12.2014 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Jüri Başkanı : Doç. Dr. Hüseyin GÜNERHAN

Raportör Üye : Doç. Dr. Can Özgür ÇOLPAN

Üye : Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI

Üye : Prof. Dr. Ali GÜNGÖR

Üye : Doç. Dr. Moghtada MOBEDI

İmza



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Gaz Tahrikli Isı Pompalı Bir Sistemin İleri Ekserji ve Eksergoekonomik Analiz Yöntemleri Kullanılarak Performansının Değerlendirilmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

22 /12/ 2014

Ayşegül GÜNGÖR ÇELİK

ÖZET**GAZ TAHRİKLİ ISI POMPALI BİR KURUTMA SİSTEMİNİN İLERİ
EKSERJİ VE EKSERGOEKONOMİK ANALİZ YÖNTEMLERİ
KULLANILARAK PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

GÜNGÖR ÇELİK, Ayşegül

Doktora Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hüseyin GÜNERHAN,

İkinci Danışman: Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI

Aralık 2014, 109 sayfa

Geleneksel ekserji temelli analiz yöntemleri enerji dönüşüm sistemlerinin performans değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Geleneksel ekserji analizi ile bir sistemde oluşan tersinmezliklerin (ekserji yıkımı), yerleri ve büyüklükleri ile maliyete ve çevreye verdiği etkiler belirlenebilir ve sistem için genel bir iyileştirme önerilebilir. Fakat geleneksel yöntemler ile tersinmezliklerin sistem komponentleri ile (iç kaynaklı/dış kaynaklı) veya teknolojik kısıtlarla (önlenebilir/önlenebilir) olan ilişkisi ortaya konamadığı için sistemin gerçek iyileştirme potansiyeli belirlenemez ve yanlış optimizasyon önerileri uygulanabilir. Bu eksiklikleri ortadan kaldırmak için, ileri ekserji temelli analiz yöntemleri geliştirilmiştir.

Doktora tezinde, gaz motoru tahrikli ısı pompalı kurutma sisteminin performansı, ileri ekserji ve ileri eksergoekonomik analiz yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Her bir sistem bileşeni için önlenebilir/önlenebilir ve iç kaynaklı/dış kaynaklı ekserji yıkımları, modifiye ekserji verimliliği ve modifiye ekserji yıkım oranları belirlenmiştir. İleri ekserji analiz sonuçlarına göre; kompresör, evaporatör ve kurutma kabini dışında geri kalan sistem bileşenlerinin ekserji yıkımlarının büyük bir kısmı önlenebilir olarak hesaplanmıştır. Bu önlenebilir kısımların tasarımda yapılacak olan yapısal iyileştirmeler ile azaltılabileceği görülmüştür. Özellikle kompresör ve çift borulu ısı değiştiricisinde meydana gelen ekserji yıkımlarının, bileşenlerin kendi çalışma koşullarından ileri geldiği saptanmıştır.

Diğer taraftan kondenser verimliliğinin artırılması geri kalan sistem bileşenlerinin geliştirilmesi veya tüm sistemde genel olarak yapısal iyileştirmeler ile mümkün olabileceği söylenebilir. Isı pompası ünitesi ve tüm kurutma sisteminin ekserji verimliliği sırasıyla, %82,51-85,11 ve %79,71-81,66 arasında değişirken, modifiye ekserji verimliliği %85,70-89,26 ve %84,50-86,00 arasında hesaplanmıştır.

İleri eksergoekonomik analiz sonuçları tüm sistem bileşenleri için önlenebilir ekserji yıkım akımı maliyetlerinin önlenemez kısımdan daha yüksek olduğu görülmüştür. Toplam önlenebilir maliyet değerlerine göre sistemdeki başlıca bileşenler; sırasıyla, kurutma kanalları, kondenser ve genişleme vanası olarak alınmıştır. Kondenserde meydana gelen tersinmezliklerin, geri kalan bileşenlerde yapılabilecek olan yapısal iyileştirmeler ile azaltılabileceği söylenebilir. Sistem bileşenlerinde yapılacak olan yapısal değişimlerin toplam maliyet üzerinde önemli bir etkiye sahip olacağı saptanmıştır.

Anahtar sözcükler: Gaz motoru tahrikli ısı pompası, ekserji analizi, eksergoekonomik analiz, ileri ekserji analizi, ileri eksergoekonomik analiz.

ABSTRACT**PERFORMANCE ASSESSMENT OF A GAS ENGINE DRIVEN HEAT
PUMP DRYER SYSTEM USING ADVANCED EXERGY AND
EXERGoeCONOMIC ANALYSIS**

GUNGOR CELIK, Aysegul

Ph.D. in Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Huseyin GUNERHAN,

Co-Supervisor: Prof. Dr. Arif HEPBASLI

December 2014, 109 pages

Conventional exergy based analysis methods are used for evaluating the performance of the energy conversation systems. With conventional exergy based analyses, the locations, magnitudes and causes of irreversibilities (exergy destructions), costs and environmental impacts are identified, and a general direction for improvement is indicated. However, none of the conventional analyses are able to reveal interactions among system components (endogenous/exogenous) or present technical limitations (avoidable/unavoidable). Hence, the real potential for improvement and optimization strategies can be misguided. Advanced exergy based analyses attempt to address this shortcoming.

In this thesis, a gas engine driven heat pump dryer system was evaluated using both advanced exergy and advanced exergoeconomic analysis methods. For each system component, avoidable/unavoidable and endogenous/exogenous exergy destructions, modified exergy efficiency values and modified exergy destruction ratios were determined. Advanced exergy analysis shows that except for the compressor, the evaporator and the drying cabinet, most of the exergy destructions in the system components were avoidable and these avoidable parts can be reduced by design improvements.

The results indicated that inefficiencies within the compressor and the double-pipe heat exchanger are mainly due to the internal operating conditions while the efficiency of the condenser could be improved by structural improvements of the whole system and the remaining system components.

For the heat pump unit and the overall drying system, the values for exergy efficiency were obtained to be in the range of 82.51–85.11% and 79.71-81.66% while those for the modified exergy efficiency were calculated to be in the range of 85.70–89.26% and 84.50-86.00%, respectively.

The advanced exergoeconomic analysis shows that the unavoidable part of the exergy destruction cost rate within the components of the system is lower than the avoidable part. The most important components based on the total avoidable costs are drying ducts, the condenser and the expansion valve. The inefficiencies within the condenser could particularly be improved by structural improvements of the whole system and the remaining system components. Finally, it may be concluded that the internal design changes play a more essential role in determining the cost of each component.

Keyword: Gas engine heat pump, exergy analysis, exergoeconomic analysis, advanced exergy analysis, advanced exergoeconomic analysis.

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince benden desteğini esirgemeyen, bu tez çalışması süresince değerli görüş ve desteklerini veren, bilimsel açıdan her zaman yanımda olan danışmanlarım Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI ve Doç. Dr. Hüseyin GÜNERHAN'a sürekli destekleri nedeniyle teşekkür ederim. Ayrıca, tezin geliştirilmesine katkı koyan tez izleme jüri üyelerim Sayın Prof. Dr. Ali GÜNGÖR ve Prof. Dr. Zuhale OKTAY'a teşekkür ederim.

Bunun yanı sıra, tez çalışmasının bir bölümünü yürüttüğüm, Berlin Teknik Üniversitesi'nde bilimsel bilgi birikimlerinden yararlandığım, Prof. George Tsatsaronis'e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, her zaman benim yanımda olmuş ve her zaman yanımda olmalarını isteyeceğim değerli annem Tülin GÜNGÖR, babam İlhan GÜNGÖR ve eşim Özgür ÇELİK'e teşekkürü bir borç bilirim.



xiii
İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SEMBOLLER LİSTESİ	xix
1. GİRİŞ	1
2. TEZ ÇALIŞMASININ ÖNEMİ, KAPSAMI VE AMACI	3
2.1. Tez Çalışmasının Önemi	3
2.2. Tez Çalışmasının Kapsamı	3
2.3. Tez Çalışmasının Amacı	4
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
3.1. İleri Ekserji Analiz Uygulamaları	6
3.2. İleri Eksergoekonomik Analiz Uygulamaları	9
4. DENEYSEL DÜZNEK VE ÖLÇÜMLER	11
4.1. Tarihsel Gelişimi	11
4.2. Çalışma Prensipleri	12
4.3. İncelenen GMIP Kurutucu Sisteme Ait Bilgiler	15
4.4. Ölçüm Sistemi	17
4.5. Malzeme	18
4.6. Belirsizlik Analizi	18
5. METODOLOJİ VE TERMODİNAMİK BAĞINTILAR	21

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.1. Geleneksel Ekserji Analiz Yöntemi.....	21
5.1.1. Ekserji Analizi.....	22
5.1.2. Eksergoekonomik Analiz.....	24
5.2. İleri Ekserji Analizi Yöntemi	28
5.2.1. Ekserji Yıkımlarının Parçalara Ayrılması.....	29
5.2.2. Önlenebilir ve Önlenebilir Yıkımların İç ve Dış Kaynaklı Yıkımlara Ayrılması	31
5.3. İleri Eksergoekonomik Analizi Yöntemi	32
6. EKSERJİ ANALİZ YÖNTEMLERİNİN SİSTEME UYGULANMASI.....	34
6.1. Geleneksel Ekserji Analizi.....	34
6.2. Geleneksel Eksergoekonomik Analizi	41
6.3. İleri Ekserji Analizi	44
6.4. İleri Eksergoekonomik Analizi	46
7. BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA.....	49
8. SONUÇLAR	78
KAYNAKLAR DİZİNİ	81
ÖZGEÇMİŞ	87

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.1. GMIP kurutucu sisteminin görünüşü.....	16
4.2. Tüm GMIP kurutucu sisteminin ölçüm sisteminin görünüşü.....	16
5.1. İleri ekserji analizinde bir komponentin ekserji yıkım akımlarının iç kaynaklı/dış kaynaklı ve önlenebilir/önlenebilir kısımlarına ayrılmasının şematik gösterimi.....	29
6.1. GMIP kurutucu sisteminin şematik gösterimi	35
6.2. GMIP kurutucu sisteminin ileri ekserji analiz kabulleri ile şematik gösterimi	46
7.1. GMIP sisteminin Rezene (<i>Foeniculum vulgare</i>) bitkisi için ileri ekserji analiz sonuçları	59
7.2. GMIP sisteminin Ebegümeci (<i>Malva sylvestris L.</i>) bitkisi için ileri ekserji analiz sonuçları	59
7.3. GMIP sisteminin Kekik (<i>Thymus vulgaris</i>) bitkisi için ileri ekserji analiz sonuçları	60
7.4. GMIP kurutucu sistem bileşenlerinin modifiye ekserji verimliliği dağılımı.....	61
7.5. GMIP kurutucu sistemi için yatırım maliyetlerinin gösterimi.....	77



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Önceden yapılan çalışmalar	5
5.2. İleri eksergoekonomik analizinde kullanılan eşitlikler	32
6.1. Satın alınan komponent maliyetleri ile seviyelendirilmiş ilk yatırım, bakım-onarım ve toplam maliyet akımı	41
6.2. GMIP kurutucu sistemi için geleneksel ekserji ve eksergoekonomik eşitlikleri	42
6.3. GMIP kurutucu sisteminin gerçek, teorik ve önlenemez çalışma koşulları	44
6.4. GMIP kurutucu sisteminin için önlenemez yatırım maliyetleri	48
7.1. Kurutma deneyleri sırasındaki ölçümlerin belirsizlikleri ve beklenen değerlerin toplam belirsizliği	49
7.2. GMIP kurutucu sisteminde deneysel veriler ile elde edilen bazı termodinamik değerler	51
7.3. İleri ekserji analizi için önlenemez koşullar uygulandıktan sonra elde edilen termodinamik veriler	52
7.4. GMIP kurutucu sisteminde geleneksel ekserji analizi kullanılarak elde edilen sonuçlar	53
7.5. Modifiye ekserji verimliliği ve ekserji yıkım oranı parametreleri ile geleneksel ekserji analizi sonuçları	57
7.6. GMIP kurutucu sisteminin detaylı ileri ekserji analiz sonuçları	63
7.7. GMIP kurutucu sisteminin geleneksel eksergoekonomik analizi sonuçları	66

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)**Çizelge****Sayfa**

7.8. GMIP kurutucu sisteminde Ebegümeci (<i>Malva sylvestris L.</i>) bitkisi için yatırım maliyetlerinin bölümlere ayrılması.....	69
7.9. GMIP kurutucu sisteminde Rezene (<i>Foeniculum vulgare</i>) bitkisi için yatırım maliyetlerinin bölümlere ayrılması.....	70
7.10. GMIP kurutucu sisteminde Kekik (<i>Thymus vulgaris</i>) bitkisi için yatırım maliyetlerinin bölümlere ayrılması.....	71
7.11. GMIP kurutucu sisteminde Ebegümeci (<i>Malva sylvestris L.</i>) bitkisi için ekserji yok oluş akımı maliyetlerinin bölümlere ayrılması.....	74
7.12. GMIP kurutucu sisteminde Rezene (<i>Foeniculum vulgare</i>) bitkisi için ekserji yok oluş akımı maliyetlerinin bölümlere ayrılması.....	75
7.13. GMIP kurutucu sisteminde Kekik (<i>Thymus vulgaris</i>) bitkisi için ekserji yok oluş akımı maliyetlerinin bölümlere ayrılması.....	76

SEMBOLLER LİSTESİ

<u>İndisler</u>	<u>Açıklama</u>
e	özell ekserji (kJ/kg)
$\dot{E}$	ekserji akımı (kW)
c	birim ekserji maliyeti (\$/GJ)
$\dot{C}$	ekserji maliyet akımı (\$/h)
CRF	gerikazanım faktörü (-)
f	eksergoekonomik faktör (-)
$\dot{F}$	yakıt ekserji akımı (kW)
$\dot{I}P$	iyileştirme potansiyeli akımı (kW)
h	özell entalpi faktör (kJ/kg)
i	bileşik faiz (%)
$\dot{m}$	kütlesel debi (kg/s)
n	sistem ömrü (yıl)
P	basınç (kPa)
$\dot{P}$	ürün ekserji akımı (kW)
PEC	bileşen alış fiyatı (\$)
PWF	paranın şimdiki değeri faktörü (\$)
RI	görel tersinmezlik (%)
r	bağıl maliyet farkı
s	özell entropi (kJ/kgK)
SI	sürdürülebilir indeks (-)

SEMBOLLER LİSTESİ (devam)

<u>İndisler</u>	<u>Açıklama</u>
T	sıcaklık (°C)
$\dot{W}$	net güç (kW)
y	ekserji yıkım oranı (-)
$\dot{Z}$	yatırım maliyeti akımı (\$/h)
<u>Alt indis</u>	
a	hava
act	gerçek
D	yok oluş (yıkım)
$EVAP$	evaporatör
F	yakıt
GEN	genleşme vanası
k	herhangi bir (k) komponent
$KOND$	kondenser
$KOMP$	kompresör
$K.KABİNİ$	kurutma kabini
$K.KANALLARI$	kurutma kanalları
P	ürün
r	soğutucu akışkan
w	soğutma suyu

SEMBOLLER LİSTESİ (devam)

<u>İndisler</u>	<u>Açıklama</u>
<u>Üst indis</u>	
<i>AV</i>	önlenebilir
<i>AV,EN</i>	önlenebilir iç kaynaklı
<i>AV,EX</i>	önlenebilir dış kaynaklı
<i>EN</i>	iç kaynaklı
<i>EX</i>	dış kaynaklı
<i>UN</i>	önlenebilir
<i>UN,EN</i>	önlenebilir iç kaynaklı
<i>UN,EX</i>	önlenebilir dış kaynaklı
<i>T</i>	termal
<i>PH</i>	fiziksel
<i>*</i>	modifiye
<u>Yunan Harfleri</u>	
Δ	fark
ε	ekserjetik verim (%)
<u>Kısaltmalar</u>	
EXCEM	ekserji-maliyet-enerji-kütle (exergy-cost-energy-mass)
KÇ	kurutma çemberi
ÇBİD	çift borulu ısı değiştirici
EGİD	egzoz gazı ısı değiştiricisi

SEMBOLLER LİSTESİ (devam)

<u>İndisler</u>	<u>Açıklama</u>
<i><u>Kısaltmalar</u></i>	
GM	gaz motoru
GMIP	gaz motoru tahrikli ısı pompası
IP	ısı pompası
TAI	tersinir adyabatik ısıtıcı
SPECO	özgül ekserji maliyeti (specific exergy costing)

1. GİRİŞ

Günümüzde, araştırmacıların ve politikacıların en önem verdiği sorunların başında sürekli artan enerji ihtiyacı ve çevresel kirlilik gelmektedir. 2011 yılı sonu itibarıyla dünyada tüketilen birincil enerji kaynaklarına bakıldığında %31,5'nin petrol, %28,8'nin kömür, %21,3'nün doğal gaz, %10'unun biyogaz ve atıklar, %5,1'nin nükleer, %2,3'ünün hidro ve %1'nin diğer kaynaklardan (jeotermal, rüzgâr, güneş v.b.) elde edildiğini görülmektedir (IEA, 2013). Elektrik üretimi için kullanılan birincil enerji kaynaklarının toplam enerji içindeki payları ise sırası ile %41,3 kömür, %21,9 doğalgaz, %15,8 hidro, %11,7 nükleer, %4,8 petrol ve %4,5'i diğer kaynaklar olarak belirtilmiştir (IEA, 2013).

Türkiye'de genel enerji dengesi içinde yukarıda verilen veriler göz önüne alındığında dünyada ve Türkiye'de kullanılan birincil enerji kaynaklarında fosil yakıtlar olan kömür, petrol ve doğal gaz ağırlıklarını korumaktadırlar. Buna paralel olarak fosil kaynaklı yakıtlarla yapılan enerji üretimi, atmosfere salınan sera gazlarından dolayı küresel ısınma ve çevresel kirlenmenin en büyük nedenlerinden biridir. Bu sebeplerden dolayı çevreyle dost olan ve yenilenebilir kaynakları yakıt olarak kullanabilen enerji dönüşüm sistemleri alanlarındaki çalışmalar büyük önem kazanmıştır. Fakat yüksek kurulum masraflarından dolayı alternatif enerji kaynakları yaygınlaşamamıştır. Araştırmaların odaklandığı bir diğer eksen ise var olan sistemlerin verimliliğinin yükseltilmesi ve bu yolla enerji tüketiminin düşürülmesidir. Bu şekilde hem enerji kaynaklarının tükenmesi gecikmekte, hem de çevreye verdikleri zarar azaltılmaktadır. Bu çalışmalar ile enerji masrafları azaltılabildiği gibi, geliştirilen sistemlerin kurulum masrafları da yüksek olmadığından uygulanabilirliği yüksektir. Tüm bu özellikleri ile sistem verimliliklerinin artırılmasına dönük çalışmalar sadece araştırmacıların değil aynı zamanda yatırımcıların da yoğun ilgisini çekmektedir (Hepbaşlı ve diğ., 2007).

Ekserji, enerjinin faydalılığının, kalitesinin bir ölçüsü olarak görülebilir ve bir maddenin çevreyle etkileşim potansiyelinin etkin bir ölçümüdür. Ekserji, enerjiden farklı olarak, korunmaz ve atıklarla orantılı bir şekilde sistemde entropi üretilmektedir. Dolayısıyla, enerji analizi sadece ısı kayıplarını azaltmak veya ısı geri kazanımını arttırmak için kullanılırken, ekserji analizi ile sistemdeki

tersinmezlikler belirlenebilmekte, enerji kayıpları minimize edilebilmekte ve kullanılmadan atılan enerjinin değerlendirilmesi sağlanabilmektedir (Dinçer ve Şahin, 2013).

Eksergoekonomik analiz, ekserji analizi ve ekonomik analizi bir araya getirmektedir. Bu analiz, sistem içindeki ekserji akımlarına ve termodinamik verimsizliklere parasal değerler atayan bir ekserjetik maliyetlendirme yöntemidir. Aynı zamanda eksergoekonomik analiz, sistem tasarımcısına geleneksel enerji esaslı ve ekonomik değerlendirmelerin elde edemediği bilgiler sağlar. Eksergoekonominin belirleyebildiği gerçek maliyet kalemleri; her bileşen için yatırım maliyeti, işletme ve bakım giderleri, ekserji yıkımı maliyeti ve tüm sistemin ekserji kaybı maliyetleridir.

Geleneksel ekserji analizi ile bir sistemde oluşan tersinmezliklerin, yerleri ve büyüklükleri ile maliyete ve çevreye verdiği etkiler belirlenebilir ve sistem için genel bir iyileştirme önerilebilir. Fakat geleneksel ekserji analiz yöntemlerinin hiç biri, sistem bileşenleri arasındaki etkileşim sonucu oluşan tersinmezliklerin yorumlanmasında ve sistemde gerçekleştirilebilecek gerçek potansiyel iyileştirmeyi tayin etmede kullanılamamaktadır. Örneğin, geleneksel ekserji analizinde bir bileşende meydana gelen toplam ekserji yıkımı belirlenebilir. Fakat bu bileşende meydana gelen toplam yıkım sadece ele alınan bileşenin kendisinden kaynaklı olmayabilir. Sistemi oluşturan diğer bileşenlerde meydana gelen tersinmezliklerin de bu yıkıma katkısı olmaktadır. Bu nokta da ileri ekserji temelli analiz yöntemleri uygulanarak sistem bileşenlerinin birbirlerini nasıl etkilediği hakkında yorum yapılabilir ve incelenen sistemin veriminin artırılması, ekonomik optimizasyonu gibi gerekli iyileştirmeler yapılarak sistemin en uygun değerlerde çalışması sağlanabilmektedir.

2. TEZ ÇALIŞMASININ ÖNEMİ, KAPSAMI VE AMACI

2.1. Tez Çalışmasının Kapsamı

Ekserji analizi; ekserji yıkımlarının ve kayıplarının yerini, tipini ve miktarını doğru bir şekilde belirleyebildiği için sistemlerin tasarlanmasında ve geliştirilmesinde önemli rol oynar. Böylece sistemdeki tersinmezlikler belirlenebilmekte, enerji kayıpları minimize edilebilmekte ve enerjinin daha verimli kullanımı sağlanabilmektedir. Fakat bilinen geleneksel ekserji analiz yöntemleri ile sistem bileşenleri arasındaki etkileşim sonucu oluşan tersinmezlikler ve/veya gerçekleştirilebilecek gerçek potansiyel iyileştirme miktarları tayin edilememektedir. Sistemde meydana gelen tersinmezliklerin (ekserji yıkımlarının) sebeplerinin açıklanabilmesi için parçalara ayrılması enerji dönüşüm sistemlerinin geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. İleri ekserji analiz metodu da ekserji yıkımlarının parçalara ayrılması yöntemine dayanmaktadır. Bu nedenle bu tezde tüm enerji dönüşüm sistemlerinde uygulanabilecek olan ileri ekserji ve ileri eksergoekonomik analiz yöntemlerinin yaygınlaştırılması ve doğru çözümler önerilmesi için örnek oluşturması amaçlanmıştır.

2.2. Tez Çalışmasının Önemi

Enerji tüketimi incelendiğinde, başta evsel tüketim olmak üzere enerjinin en yoğun tüketildiği alanlar su ve hava ısıtması/soğutması ile iklimlendirme olarak karşımıza çıkmaktadır. Endüstriyel uygulamalara baktığımızda ise özellikle kurutma, enerjinin yoğun tüketildiği bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Çoğu sanayileşmiş ülkede, kurutmada kullanılan enerjinin payı, ülkenin sanayide tükettiği enerjinin %7-15'i arasında olup, çoğunlukla ısı verimi %25 ile %50 arasında değişmektedir. Tahminlere göre, tarımsal ürünlerdeki toplam enerji ihtiyacının %60'ından fazlası kurutma işlemlerinde kullanılmaktadır (Mujumdar, 1997). Bundan dolayı özellikle kurutma işlemlerinde ekserji analizi uygulamaları ile sıklıkla karşılaşılmaktadır.

Kurutma işlemlerinin ekserji analizi uygulamaları ile pek çok çalışma yapılmış olmasına karşın, özgün bir alan olarak gıda kurutmasındaki çalışmalar sınırlı kalmıştır.

Günümüzde enerji verimliliğine verilen önem nedeniyle, ısı pompalarının en yeni tiplerinden birisi olan gaz motoru tahrikli ısı pompalarına (GMIP) olan ilgi artmaktadır. GMIP; açık tip bir kompresörün gaz motoru ile tahrik edildiği yeni tip bir ısı pompasından (günümüz cazip yeni teknolojilerinden birisi) oluşmaktadır. Bu tezde, GMIP bir kurutucu sisteminin ileri ekserji ve ileri eksergoekonomik analizleri yapılarak sistem veya sistem bileşenlerinde potansiyel iyileştirilme oranlarının doğru bir şekilde tespit edilmesi amaçlanmıştır.

2.3. Tez Çalışmasının Amacı

Tez çalışmasının genel amacı; enerji dönüşüm sistemlerinin daha verimli bir şekilde çalışmasına katkı sağlayacak analiz yöntemlerinin uygulamalarının yapılması ve çözümlerin ortaya konmasıdır. Son yıllarda enerjinin öneminin artışı, çevre kirliliğinin önlenmesine dönük çabalar ve enerji maliyetlerindeki artış, kurutma gibi enerjinin yoğun olarak kullanıldığı bu işlemlerde enerji tüketiminin optimizasyonunu özel olarak önemli hale getirmiştir.

Enerjinin verimli ve etkin kullanımının sağlanabilmesi için ekserji analizinin önemi son yıllarda artmaktadır. Geleneksel ekserji analizi ile tersinmezliklerin yeri, büyüklüğü, maliyeti ve çevresel etkileri belirlenir ve buna göre genel iyileştirmeler önerilir. Fakat geleneksel ekserji analiz yöntemleri ile sistemi oluşturan bileşenler arasındaki ilişki ve ekserji yıkımlarının bileşenler üzerindeki etkisi belirlenememektedir. Dolayısıyla geleneksel ekserji analiz metodu ile sonuçlar yanlış yorumlanabilir ve gerekli potansiyel iyileştirmeler önerilemez. İleri ekserji analiz yöntemi, ekserji yıkımlarının parçalarına ayrılması esasına dayanarak bu eksiklikleri gidermeyi amaçlamaktadır. İleri ekserji ve ileri eksergoekonomik analiz yöntemleri oldukça yeni geliştirilmiş bir yöntem olup literatürde az sayıda örnek bulunmaktadır. Bu tezde, gıda kurutmasında kullanılan GMIP bir kurutucu sistemin ileri ekserji, ileri eksergoekonomik analizinin yapılarak sistem bileşenleri için doğru iyileştirme potansiyellerinin saptanması amaçlanmaktadır.

3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, gaz motoru tahrikli ısı pompalı bir kurutma sistemi ileri ekserji ve ileri eksergoekonomik analiz yöntemleri uygulanarak değerlendirilmiştir. İleri ekserji temelli analiz yöntemleri oldukça yeni geliştirilmiş bir metod olup literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar Çizelge 3.1 ile verilmiştir.

Çizelge 3.1. Önceden yapılan çalışmalar.

No	Araştırmacılar	Uygulanan Analiz Yöntemi	Uygulama Alanı
1	Morosuk ve Tsatsaronis (2008)	İleri ekserji analizi	Absorpsiyonlu bir soğutma makinası
2	Kelly ve diğ. (2009)	İleri ekserji analizi	Teorik çalışma
3	Morosuk ve Tsatsaronis (2009)	İleri ekserji analizi	Gaz türbin sistemi
4	Morosuk ve Tsatsaronis (2009)	İleri ekserji analizi	Soğutma makinesi
5	Tsatsaronis ve Morosuk (2010)	İleri ekserji analizi	Kojenerasyon sistemi
6	Petrakopoulou ve diğ. (2012)	İleri ekserji analizi	Birleşik güç üretim sistemi
7	Boyano ve diğ. (2012)	İleri ekserji analizi	Metan buharı işleme tesisi
8	Hepbaşlı ve Keçebaş (2013)	İleri ekserji analizi	Jeotermal kaynaklı merkezi ısıtma
9	Soltani ve diğ. (2013)	İleri ekserji analizi	Güç santrali
10	Erbay ve Hepbaşlı (2014)	İleri ekserji analizi	Toprak kaynaklı ısı pompası sistemi
11	Açıkkalp ve diğ. (2014)	İleri ekserji analizi	Trijenerasyon sistemi
12	Açıkkalp ve diğ. (2014)	İleri ekserji analizi	Elektrik üretim tesisi
13	Morosuk ve diğ. (2012)	İleri eksergoekonomik analiz	Doğalgaz yeniden gazlaştırma ve elektrik üretim tesisi
14	Manesh ve diğ. (2013)	İleri eksergoekonomik analiz	Kojenerasyon sistemi
15	Açıkkalp ve diğ. (2014)	İleri eksergoekonomik analiz	Elektrik üretim tesisi
16	Keçebaş ve Hepbaşlı (2014)	İleri eksergoekonomik analiz	Jeotermal kaynaklı merkezi ısıtma sistemi
17	Petrakopoulou ve diğ. (2013)	İleri eksergoekonomik analiz	Birleşik çevrimli güç üretim sistemi
18	Vuc'kovic' ve diğ. (2014)	İleri eksergoekonomik analiz	Endüstriyel enerji üretim tesisi

3.1.İleri Ekserji Analizi Uygulamaları

İleri ekserji analiz yöntemi kullanılan sistemler üzerine yapılan çalışmalarla ilgili olarak aşağıda verilen literatür çalışmaları elde edilmiştir:

Morosuk ve Tsatsaronis (2008) absorpsiyonlu bir soğutma makinasının performansını ileri ekserji analiz metodunu uygulayarak değerlendirmiştir. İç kaynaklı önlenebilir ve dış kaynaklı önlenebilir ekserji yıkım değerleri sistemde bulunan bileşenlerin teker teker iyileştirilmesinde önem arz etmektedir. Çalışmada ekserji yıkımlarının yanında ilk yatırım maliyetlerinde parçalara ayrılarak hesaplanması ile ileri eksergoekonomik değerlendirmenin yapılması tavsiye edilmektedir.

Kelly ve diğ. (2009) genel olarak ekserji yıkım değerlerini parçalarına ayırma metodunu teorik olarak ele almışlar ve enerji dönüşüm sistemlerinde kullanılmak üzere iç kaynaklı ekserji yıkım değerini hesaplanmasına yönelik dört farklı metod geliştirmişlerdir.

Morosuk ve Tsatsaronis (2009) kapalı termodinamik çevrime sahip bir gaz türbin sistemine ileri ekserji analizi uygulamışlardır. Sistemde bulunan bileşenler arasındaki ilişkiyi tayin edebilmek için ekserji yıkım değeri, iç kaynaklı ve dış kaynaklı parçalarına ayrılmıştır. Ayrıca sistem bileşenlerinde yapılabilecek gerçek iyileştirmelerin tayini için ekserji yıkım değeri, önlenebilir ve önlenemez parçalarına da ayrılmıştır. Daha sonra bu ekserji yıkım değerlerini parçalarına ayırma metodları kombine edilerek önlenemez iç ve dış kaynaklı, önlenebilir iç ve dış kaynaklı ekserji yıkımları elde edilmiştir. Çalışmada son olarak kimyasal reaksiyon içeren sistemlerde kullanılacak gelen bir yaklaşım önerilmiştir.

Morosuk ve Tsatsaronis (2009a) ileri ekserji analiz yöntemini kullanarak buhar sıkıştırırmalı çevrime sahip olan soğutma makinesinde farklı iş akışkanlarının etkilerini değerlendirmişlerdir. Bu çalışmadaki amaç sistemde kullanılan değişik iş akışkanlarının ileri ekserji analizindeki etkilerini gözlemlemektir. Sonuçlara göre sistemde meydana gelen ekserji yıkımlarının kullanılan iş akışkanlarına göre farklılık gösterdiği belirtilmiştir.

Tsatsaronis ve Morosuk (2010) elektrik üretimi ve aynı zamanda doğal gaz sınılaştırılması yapabilen özgün bir kojenerasyon sistemini ileri ekserji analiz yöntemi kullanarak değerlendirmişlerdir. Sistem bileşenlerinde gerçekleştirilebilecek gerçekçi iyileştirme potansiyelini gösteren parametrelerin önlenebilir iç ve dış kaynaklı ekserji yıkım değerleri olduğu vurgulanmıştır. Bu görüşe göre sistem bileşenleri içerisinde öncelikli öneme sahip olan eleman genişletici, ısı değiştirici ve pompa olarak belirtilmiştir. Kompresör'ün ise geliştirilme olanağının düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Petrakopoulou ve diğ. (2012) bir birleşik çevrim güç üretimi çevrimi için geleneksel ve ileri ekserji analizi metotları uygulanmıştır. Geleneksel ekserji analizinin yetersiz kaldığı, ileri ekserji analizinin çok geniş bir optimizasyon kriteri ve iyileştirme potansiyeli bilgisi verdiği gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek ekserji yok oluş akımı sistemin toplam ekserji yok oluş akımının %87'sine sahip olan yanma odasıdır. Bu bileşendeki ekserji yok oluş akımının %68'i içsel ekserji yok oluş akımı, yani ekserji yok oluş akımı bileşenin kendi içinde meydana gelmektedir. Yanma odasını, geliştirme potansiyelindeki büyüklükler olarak türbin ve kompresör takip etmektedir.

Boyano ve diğ. (2012) hidrojen üretimi için metan buharı işleme tesisini ileri ekserji analiz yöntemini kullanarak incelemişler ve gerekli iyileştirme potansiyellerini tartışmışlardır. Yapılan ileri ekserji analizi sonucunda, sistemi oluşturan bir bileşen hariç diğer tüm bileşenler için iç kaynaklı ekserji yıkım akımı dış kaynaklı ekserji yıkım akımından büyüktür. Bunun sonucunda, bileşenler arasındaki etkileşimin zayıf olduğunu görüşüne varılmıştır. Isı değiştiriciler için önlenebilir ekserji yıkım akımı yüksek iken, hidrojen biçimlendirici ve yanma odası içinse aksi durum geçerlidir.

Hepbaşlı ve Keçebaş (2013) jeotermal kaynaklı bir merkezi ısıtma sisteminin performansının iyileştirme potansiyelini belirlemek ve sistemi oluşturan bileşenlerin bu iyileşme oranına katkısını ortaya koymak amacı ile ileri ekserji analiz metodunu kullanmışlardır.

Soltani ve diğ. (2013) biyokütlenin gaz fazına geçirilmesi işleminde kullanılan dıştan yanmalı bir kombine güç santralini ileri ekserji analizi uygulayarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre bileşenlerin iç kaynaklı ekserji yıkım akımı dış kaynaklı ekserji yıkım akımından daha yüksek bulunmuştur. Dolayısıyla sistem bileşenleri arasındaki ilişkinin zayıf olduğu belirtilmiştir. Ayrıca ileri ekserji analizinin geleneksel ekserji analizine oranla daha net sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Geleneksel ekserji analiz sonuçlarına göre en yüksek ekserji yıkımı yanma odası ve gazlaştırma cihazlarında görülmesinden dolayı bu bileşenler üzerinde durulmuştur. Fakat diğer taraftan ileri ekserji analizi yapıldığında sistem performansının iyileştirilebilmesi için ısı değiştiricilerinin ele alınmasının gerekli olduğu belirtilmiştir.

Erbay ve Hepbaşlı (2014) toprak kaynaklı bir ısı pompası sisteminin geleneksel ve ileri ekserji analiz yöntemleri uygulanarak değerlendirilmesi üzerine çalışmışlardır. Sistem bileşenleri incelendiğinde kondenserin en önemli bileşen olduğu vurgulanmıştır. Kompresörde meydana gelen tersinmezliklerin ise kompresörün kendi yapısal özelliklerinin iyileştirilmesi ile azaltılabileceği bunun yanı sıra kondenser ve evaporatör dışında kalan sistem bileşenlerinde meydana gelen ekserji yıkımlarının genel olarak iç kaynaklı olduğu belirtilmiştir.

Açıkkalp ve diğ. (2014a) trijenerasyon sisteminde meydana gelen ekserji yıkım akımlarını hesaplamışlar ve parçalarına ayırmışlardır. Buna göre, sistemde dış kaynaklı ekserji yıkımının yüksek olmasından dolayı sistemi oluşturan bileşenler arasında kuvvetli bir bağ olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca önlenabilir ekserji yıkım akımının önlenemez kısmından fazla olarak hesaplandığından sistemin iyileştirme potansiyelinin yüksek olduğu belirtilmiştir.

Açıkkalp ve diğ. (2014b) doğalgaz ile elektrik üretimi yapan bir tesisin performansını değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada iç kaynaklı ekserji yıkımının toplam ekserji yıkımına oranı %70 olarak belirtilmiştir. Dolayısıyla bileşenler arasındaki bağ oldukça zayıftır. Ayrıca sistemin geliştirme potansiyeli değeri %38 olduğundan sistemde yapılabilecek iyileştirme oranı düşüktür. Tüm sistemin iyileştirmesi için odaklanılması gereken bileşenleri; gaz türbini ve yanma odası olarak vurgulanmıştır.

3.2.İleri Eksergoekonomik Analiz Uygulamaları

Çeşitli enerji dönüşüm sistemlerine uygulanan ileri eksergoekonomik analiz uygulamaları kapsamında aşağıda verilen literatür çalışmalarına ulaşılmıştır:

Morosuk ve diğ. (2012) elektrik üretimi ve doğal gazı tekrar gazlaştırma işlemi yapan bir tesisin ileri ekserji, ileri eksergoekonomik ve ileri eksergoçevresel analizlerini uygulayarak değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, sistemdeki iyileştirme, optimizasyon potansiyelleri detaylı olarak tespit edilmiştir. Geleneksel ekserji analizinde en önemli geliştirme potansiyeline sahip olduğu gözükten kompresörün ileri ekserji analizi sonucunda ekserji yıkım akımının çok büyük kısmının önlenemez olduğu görülmektedir. Eksergoekonomik analiz sonucuna göre ise kompresör en büyük öneme sahiptir. Eksergoçevresel yaklaşımda en önemli bileşen ısı değiştiricisidir.

Manesh ve diğ. (2013) kojenerasyon sistemlerinin optimum dizaynı için yeni bir yaklaşım ortaya koymuşlar ve bunun için ileri eksergoekonomik ve ileri eksergoçevresel analiz yöntemlerinden yararlanmışlardır. Geleneksel ekserji analiz yöntemi yerine ileri ekserji temelli analiz methodlarını kullanmalarındaki amacın bu yöntemin daha kesin ve açık sonuçlar ortaya koyması ve gerekli iyileştirmelerin yapılabilmesi için gerekli ek bilgilere ulaşmanın mümkün olabilmesi şeklinde açıklamışlardır.

Açıkkalp ve diğ. (2014c) doğalgaz ile çalışan bir elektrik üretim tesisinin performansını ileri ekserji ve ileri eksergoekonomik analizi uygulayarak değerlendirmişlerdir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, yanma odası, yüksek basınç türbini ve kondenser yüksek önlenebilir ekserji yıkım akımı maliyetlerine sahip olduklarından geliştirme potansiyeli olan bileşenler olarak belirtilmiştir. Buna benzer olarak ısı geri kazanım jeneratörü yüksek yatırım maliyeti sebebi ile öneme sahip olduğu tespit edilmiştir.

Keçebaş ve Hepbaşlı (2014) geleneksel ve ileri eksergoekonomik analiz metodlarını jeotermal kaynaklı bir ısıtma sistemi üzerinden karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmada ileri eksergoekonomik metodunun bileşen bazında iyileştirme önerilmesi için daha anlamlı ve açıklayıcı sonuçlar ortaya koyduğu bildirilmiştir.

Ayrıca bileşenlerin iç kaynaklı ekserji yıkım akımının yüksek olmasından dolayı bileşen tasarımında yapılabilecek değişikliklerin maliyetin belirlenmesinde önemli rol oynadığı belirtilmiştir.

Petrakopoulou ve diğ. (2013) CO₂ yakalama işlemi yapan birleşik çevrimli güç santralini ileri eksergoekonomi analiz yöntemi ile incelemişlerdir. Sistemde en yüksek önlenabilir maliyet değerine sahip olan bileşen gaz türbini olarak belirtilmiştir. Dolayısıyla, gaz türbini sistem bileşenleri içerisinde geliştirme potansiyeli en yüksek olan elemandır. Sistem bileşenleri arasındaki etkileşimin oldukça düşük olmasından dolayı maliyetlerin büyük bir kısmının bileşenlerin kendi çalışma koşullarından kaynaklı olduğu belirtilmiştir.

Vuc'kovic' ve diğ. (2014) karmaşık bir endüstriyel enerji üretim tesisinde kritik bileşenleri belirlemek ve ekserji verimliliğinin potansiyel artış miktarını görebilmek için ileri ekserji temelli analiz yöntemleri uygulamışlardır. Sistemdeki ekserji yıkım akımının %80'inden fazlasının kazandan kaynaklandığı ayrıca bu yıkımın %85,53'ünün önlenemez olduğu tespit edilmiştir. İleri eksergoekonomik analiz sonucuna göre basınçlı hava santralinin çalışma ve bakım maliyetlerinin azaltılması önerilmektedir.

Yukarıda yapılan geniş kapsamlı literatür çalışmasından, gaz motoru tarihli ısı pompalarının gerçek deneysel veriye dayalı ileri ekserji ve ileri eksergoekonomik analizlerinin ve performans değerlendirmelerinin açık literatürde olmadığı anlaşılmaktadır. Bu, tez çalışmasının özgünlüğünü ortaya koymaktadır.

4. DENEYSEL DÜZENEK VE ÖLÇÜMLER

GMIP, içten yanmalı bir motorla tahrik edilen, açık kompresörlü ve genellikle tersinir buhar-sıkıştırma çevrimli ısı pompasından (IP) oluşmaktadır. Gaz motorunun ısı verimi düşük olmasına karşın (%30-45), egzoz gazındaki atık ısının ve motor silindir ceketlerindeki atık ısının geri kazanımı ile toplam atık ısının yaklaşık %80'inden faydalanılabilmekte ve bu da GMIP'ları verimli cihazlar haline getirmektedir.

4.1.Tarihsel Gelişimi

Enerji verimliliğinin önemi kavrandıkça ve çevre kirliliğinin sonuçları ciddiyetini göstermeye başladıkça bu konuları merkeze alan araştırma ve çalışmalar artmıştır. Bu kapsamda yapılan araştırmalarla beraber GMIP da geliştirilmeye başlamıştır. GMIP sistemleriyle ilgili ilk çalışmalar 1970'lerin sonlarında gerçekleştirilmiştir. İlk GMIP sistemi 1 Nisan 1977'de Dortmund Wellinghofen açık yüzme havuzunda kullanılmaya başlanmıştır ve bu sistemin performansı test edilmiştir (Bussmann, 1978). Bunu takip eden süreçte GMIP sistemlerinin kentlerdeki merkezi ısıtma sistemlerinde kullanımı önerilmiş, bu başlıkta çalışmalar yapılmış ve GMIP sistemlerinin ısıtma sistemi olarak uygulanabilirliği ve kısıtları ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır (Flurschetz, 1978). 1980'li yıllarla beraber GMIP sistemlerinin ev ısıtması ve sıcak su tedariki amaçlı alan testleri yapılmaya başlanmıştır (Hepbaşlı ve diğ., 2009). 1981 yılında Japon hükümeti GMIP sistemleri ile ilgili araştırmaları destekleme kararı almıştır. 1984 yılında da Avrupa Komisyonu'nun Enerji Araştırma-Geliştirme Programı çerçevesinde GMIP sistemlerinin araştırılması desteklenmeye başlanmıştır (Eustace, 1984). Bu örneklerle birlikte GMIP sistemleri devlet destekli programlarla da araştırılmaya başlanmıştır. Bu süreçte elde edilen olumlu sonuçlar özellikle gaz tedarikçisi yatırımcıların ilgisini çekmiş ve özellikle Japonya'daki doğal gaz sağlayan şirketler GMIP sistemlerine dönük araştırmaları özel olarak desteklemiştir.

GMIP sistemlerinin araştırılması ve geliştirilmesine dair bu olumlu adımlar konuyu en ciddi şekilde araştıran Japonya'da somut sonuçlarını vermiş ve ilk

ticari GMIP sistemi iklimlendirme amaçlı olarak Japonya’da üretilmiştir. “Gas-multi” ismi verilen bu ürün Nisan 1985’te Japonya’da piyasaya sürülmüştür (Ogura ve diğ., 1987). Bu tarihten itibaren dünyanın dört bir yanında GMIP sistemlerine dönük araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. GMIP sistemlerinin performansını ve ekonomik etkilerini alan testleriyle belirlemeye dönük çalışmalar, sistemin tasarımı ve parçalarının geliştirilmesini hedefleyen çalışmalar, sistem modelleme çalışmaları, endüstriyel alana uygulama çalışmaları, kontrol sistem ve stratejileri geliştirmeye dönük çalışmalar ve GMIP sistemlerinin çevreye etkisini inceleyen çalışmalar yapılmış başlıca çalışmalardır.

Bugüne gelindiğinde ise Japonya başta olmak üzere pek çok ülkede GMIP sistemleri yaygınlaşmaktadır. Günümüz itibarıyla Japonya’daki iklimlendirme piyasasının %5’lik kısmını, yıllık 40000 adedi aşan satışıyla GMIP sistemleri oluşturmaktadır. Sadece Japonya’daki üç büyük gaz şirketinin gaz dağıtımını sağladığı alanlardaki GMIP sistemlerinin sayısı 240000’e ulaşmış durumdadır ve bu sistemlerin yıllık gaz ihtiyacı 650 milyon m³ seviyesine ulaşarak, Japonya’daki gaz piyasasının %10’unu oluşturur hale gelmiştir. Avrupa’da ve ABD’de de hızla yaygınlaşan bu sistemlerle ilgili günümüzdeki ihtiyaç, bu sistemlerin endüstriyel uygulamalarının da geliştirilmesi yönüne kaymaktadır.

4.2.Çalışma Prensibi

GMIP sistemleri ticari bir ürün olarak piyasada görülmeye başlandıktan sonra, başta iklimlendirme ve su ısıtması alanları olmak üzere çeşitli endüstriyel uygulamaları denenmiştir. Ayrıca sistemin geliştirilmesi için çeşitli araştırma-geliştirme faaliyetleri yürütülmüş, sistem performans testleri gerçekleştirilmiş, ekonomik açıdan değerlendirmeye ve aynı amaçla kullanılan diğer sistemlerle kıyaslamaya tabi tutulmuş, sistemin kontrolünün geliştirilmesine çalışılmış, sistemin çevre üzerindeki etkileri araştırılmış ve sistem modellemesi yapılmıştır.

GMIP, elektrik motoru yerine gaz yakıtla çalışan içten yanmalı bir motor tarafından hareketlendirilen açık bir kompresör içeren, genellikle tersinir buhar-sıkıştırma döngülü çalışan bir IP’ndan oluşmaktadır.

Tüm sistem iki ana bölümde incelenebilir (Zhang ve diğ., 2005) :

- i. IP: bir açık kompresör, bir kondenser (yoğuşturucu), bir genişleme valfi ve bir evaporatör (buharlaştırıcı) içerir,
- ii. Gaz motoru

GMIP'nin IP bölümü klasik bir IP'ni içerir. GMIP'nin esas farklılığı kullandığı enerji kaynağıdır.

Yaygın kullanılan IP'lerinde, elektrikle çalışan bir motor aracılığıyla elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülürken, GMIP'nda elektrik enerjisi yerine gaz yakıt kullanılır. Kullanılan gaz yakıt, klasik bir içten yanmalı motora pompalanır ve yakılır. Bu işlem sonucu yakıtın kimyasal bağlarının parçalanması ile ısı açığa çıkar, basıncın değişimi ile birlikte silindirler hareketlenir ve kompresöre mekanik enerji aktarılmış olur. Bu sırada yanmış sıcak gaz dışarı atılır, yeni yakıt motora pompalanır ve işlem tekrarlanır. Bu işlemde ısı verim yüksek değildir ve genellikle %30-45 aralığında gezinir. Ancak GMIP'ni verimli kılan atık ısının yani mekanik enerjiye dönüştürülemeyen %55-70'lik ısının geri kazanımıdır. Bu ısının bir kısmı motorun ortamla teması sırasında taşınım ile kaybedilen ısı iken, diğer kısmı da egzoz gazı ile ortama bırakılan ısıdır. Motorun ısınması ile kaybedilen ısı, motor silindir ceketlerinden su/hava dolaştırılması ve ısının ısı değiştiriciler vasıtasıyla dolaştırılan suya/havaya geçirilmesi yoluyla kazanılır. Yine aynı yöntemle egzoz gazı ile birlikte atılan ısı da geri kazanılır. Bu şekilde toplam atık ısının yaklaşık %80'i suya/havaya aktarılır ve ısınmış su/hava, ya direkt olarak ürün halinde kullanılır, ya da buharlaştırıcıya gönderilerek soğutucu akışkan çevriminde faydalanılır.

Elektrik genellikle termik santrallerde yakıtların yakılması ile üretilmektedir ve atık ısı doğaya bırakılmaktadır. Daha sonra elektrik tüketileceği yere taşınmakta ve orada IP'nin motoru aracılığıyla mekanik enerjiye dönüştürülerek kullanılmaktadır. Bu şekilde enerji iki kez dönüşüme uğramakta ve bu nedenle kayıplar fazla olmaktadır.

Eğer yakıtın dönüşümü IP'na yakınlaştırılırsa yani elektrik aracılığı olmaksızın sağlanırsa hem dönüşüm sayısının azalmasından ötürü, hem de dönüşüm sırasında açığa çıkan atık ısının kullanılabilmesinden ötürü enerji verimliliğinin artırılması mümkün hale gelebilecektir.

GMIP bu düşünceyle uyumlu çalışan ve özellikle ısıtma işlemlerinde yüksek verim sağlayan sistemlerdir (Lian ve diğ., 2005; Hepbaslı ve diğ., 2009).

Bu şekilde gaz motorunun ısı verimi ciddi şekilde artırılır ve yakıtın direk kullanılmasından dolayı da sistemin verimi elektrikli sistemlere göre yüksek olur. Çünkü elektrikli sistemlere elektrik ulaşana kadar ciddi kayıplar meydana gelir ve sistem dışında olduğu için bunlara müdahale şansı yoktur.

Başka bir deyişle gaz yakıt termik santrallerde yakılarak elektriğe dönüşür. Bu dönüşüm sırasında enerji kayıpları yaşanır ve ek olarak egzoz gazının doğaya bırakılmasından ötürü de ciddi ısı kaybı yaşanır. Bu işlem dizisi sırasında enerji iki kez dönüşüme uğratıldığından (yakıttan elektrik, elektrikten mekanik enerji) verim düşer ve dönüşümlerden birisi sistemden tamamen ayrı bir noktada yaşandığından geri kazanım sağlanamaz.

GMIP'ları, geleneksel klima cihazlarından daha uygun iklim kontrolü sağlarlar. En önemli avantajları aşağıda verildiği gibi sıralanmıştır:

a) *Değişken hız işletmesi:* Tipik olarak, GMIP minimum hızda çalışmakta olup, gerekli yüke uymak için minimum ve maksimum hız arasında ayarlanabilir. Minimum ve maksimum hızlara, farklı motor ve kompresör performansı ile karar verilir. Sonuç olarak, böyle bir sistemin kısmi yük verimi yüksektir. Mevsimsel işletme gideri ve çevrim kayıpları, aç-kapa çalışan kontrol sistemleri olan tek hızlı sistemlerinkinden daha düşük olacaktır.

b) *Motorun ısı geri kazanımı:* Motorun ısı verimi, çok yüksek değildir (Gazlı motorlar için şimdilerde yaklaşık %30-45). Yakıtın yanma ısısı, egzoz gazları, soğutma suyu ve motor bloğuyla atılır. Bununla beraber, sistemin verimi, ısıtma modunda soğutma suyu ve egzoz gazlarından ısının geri kazanılmasıyla artırılabilir.

c) *Doğal gaz yakıtı:* GMIP aynı zamanda, elektrikli ısı pompasından enerji kullanımı bakımından fark eder, esas itibariyle elektriğin yerine doğal gaz veya propan kullanılır. Bu yüzden, GMIP elektrik giderlerinin yüksek ve doğal gazın mevcut olduğu yerlerde tercih edilirler.

GMIP'ları, enerji tüketiminde önemli bir azalma sağlar. Buna karşın bu sistemler günümüzde halen yaygınlaşamamış, özellikle sanayide kendine henüz yer bulamamıştır. Bunun ilk sebebi kurulum masraflarının yüksekliği, ikincisi ise özellikle sanayi uygulamalarının ve denemelerinin azlığı dolayısıyla yatırımcıların bu sistemleri uygulamaya çekinmeleridir.

Enerji ve çevre sorunlarının dünyada ele alınan en önemli konular olduğu düşünülürse, GMIP'larının enerji verimliliği ve düşük işletim masrafları göz önüne alındığında, ekonomik bir seçenek olduğu halde halen yaygınlaşamamış olması düşündürücüdür. Kurulum masraflarının yüksekliği genellikle işletim masraflarının düşüklüğü ile karşılanabilir durumdadır. Ancak asıl problem yatırımcıların yüksek kurulum maliyetli bir sisteme yatırım yapmaya çekinmesi, yapılmış örnekler görmek istemesi ve ikna olmaya ihtiyaç duymasıdır. Bu noktada araştırmacılara düşen görev ise GMIP uygulamalarını çeşitlendirmek ve enerjinin yoğun tüketildiği başka alanlara da taşımaktır.

4.3. İncelenen GMIP Kurutucu Sistemine Ait Bilgiler

Gaz Motoru Tahrikli Isı Pompalı Bantlı Kurutucu Sistemi, TÜBİTAK projesi (106M482) kapsamında Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik laboratuvarında kurulmuştur. Gaz motoru tahrikli ısı pompalı bantlı bir kurutma sisteminin performansının ekserjetik olarak değerlendirilmesi isimli yüksek lisans tezi kapsamında üç farklı tıbbi ve aromatik bitki GMIP kurutucu sisteminde kurutulmuş ve sistemin/kurutma prosesinin ekserji analizi ile değerlendirilmesi yapılmıştır (Güngör, 2010). Doktora tezi kapsamında GMIP sistemi kullanılarak sistem bileşenlerinin ileri ekserji ve ileri eksergoekonomik analizleri yapılmıştır. İncelenen GMIP kurutucu sisteminin görünüşü Şekil 4.1'de ve ölçüm sistemine ait görünüş Şekil 4.2'de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.1 GMIP kurutucu sisteminin görünüşü.

(a) GM ünitesi (b) Tüm kurutma sistemi



(a)



(b)

Şekil 4.2 Tüm GMIP kurutucu sisteminin ölçüm sisteminin görünüşü.

(a) GM ünitesi basınç, sıcaklık ölçümü (b) Kurutma kabini ölçüm sistemi

Sistem temel olarak iki ana bölümden oluşmaktadır: (a) GMIP, (b) kurutma kanalları ve kabininden oluşan kurutma çemberi (KÇ).

(a) GMIP: İçten yanmalı bir gaz motoru (GM), 2 adet scroll tip kompresör, kondenser, evaporatör, genleşme vanası, egzoz gazı ısı değiştiricisi (EGID), çift borulu ısı değiştirici (ÇBID) ve su pompasından oluşmaktadır. Sistem çevriminde, IP kısmında soğutucu akışkan R407-C, GM kısmında ise ÇBID, EGID ve motor silindir ceketlerinden ısı geri kazanımlarını sağlamak amacıyla motor soğutma suyu kullanılmaktadır. Motor da yakıt olarak LPG kullanılmıştır. Yanma sonucu açığa çıkan ısıdan motor silindir ceketlerinden dolaştırılan soğutma suyu ile yararlanır. Aynı şekilde egzoz gazının atık ısı EGID ile soğutma suyuna geçer. ÇBID içerisinde soğutucu akışkan ve soğutma suyu arasında ısı transferi gerçekleşir. Bu sayede soğutucu akışkanın daha hızlı bir şekilde buharlaşması sağlanmış olur ve verimlilik artar.

(b) Kurutma çemberi: Kurutma çemberi, kurutma kabini ve kurutma kanallarından meydana gelmektedir. Kurutma kabini 3m x 1m x 1m ebatlarındadır ve ürün kabin içerisinde bir bant motoru tarafından hareketlendirilen teflon malzemeden imal edilmiş konveyör bir bant sistemiyle taşınır. Kabin içerisindeki havanın etkin şekilde dolaşımının sağlanması için kabin içerisindeki çeşitli noktalara hava kanatları yerleştirilmiştir.

4.4. Ölçüm Sistemi

GMIP kurutucu sisteminde üç farklı tıbbi ve aromatik bitki türü olan kekik (*T.vulgaris*), ebegümece (*M.sylvestris*) ve rezene (*F.vulgare*) bitkileri kurutulmuşlardır. Bitkiler üst üste gelmeyecek şekilde tepsilere ince tabaka halinde konulmuş ve daha sonrasında kurutucu bandın üzerine yerleştirilmiştir. Kurutma işlemleri 45 °C sıcaklıkta ve 1 m/s hava hızında, 120-240 dakika süre aralığında gerçekleştirilmiştir.

Hava hızı ölçümleri hava hızı ölçüm probu (Testo 0635.9540, Almanya) ve teleskopu (Testo 0430.0941, Almanya) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Sıcaklık ile göreceli nem ölçümleri, nem ve sıcaklık ölçüm probu (Testo 0636.2140, Almanya) kullanılarak yapılmış ve tüm bu ölçümler çok fonksiyonlu ölçüm cihazı (Testo 350-XL/454, Almanya) ile okunarak kaydedilmiştir. Kurumakta olan ürünün yüzey sıcaklığı infrared termometre ile (Testo 525-T2, Almanya), kurutucu ekipmanın yüzey sıcaklığı ise yüzey ısı ölçeri ile (METEX ME-32, Güney Kore) tespit edilmiştir. Ağırlık kayıpları analitik terazi (SartoriusGE7101, Almanya) ile izlenerek belirlenmiştir. IP'nın performansının belirlenmesi amacıyla soğutucu akışkanın dolaştığı borulara basınç ölçüm problemleri (Testo 0638.01941, Almanya) ile yüzey sıcaklığı ölçüm problemleri (Testo 0628.0019, Almanya) yerleştirilmiştir. Soğutucu akışkan kütleli debisinin belirlenmesi amacıyla lazer takometre ile kompresör devri ölçülmüştür. Egzoz gazı ekserji analizi için egzoz gazı analizörü ile yanma sonucunda açığa çıkan gazların yüzde oranları ölçülmüştür. ÇBİD ve EGİD'sinden geri kazanımları belirlemek için soğutma suyu ve egzoz gazı giriş-çıkış borularına ile yüzey sıcaklığı ölçüm problemleri (Testo 0628.0019, Almanya) yerleştirilmiştir. Tüm ölçümler 15 dakika ara ile kaydedilmiştir.

4.5. Malzeme

Rezene (*Foeniculum vulgare*), ebegümeci (*Malva sylvestris L.*) ve kekik (*Thymus vulgaris*) bitkileri İzmir'de yerel bir marketten satın alınmıştır. Bitkiler yapraklarına ayrıldıktan sonra suyla yıkanmışlar daha sonra filtre kağıdına alınarak yüzeylerindeki fazla su uzaklaştırılmıştır. Bitkiler alındıktan en fazla 24 saat içinde kurutulmuşlardır.

4.6. Belirsizlik Analizi

Deneyisel çalışmalar her zaman incelenen sistemlerin gerçekliği açısından sayısal ve analitik çalışmalardan daha ön planda yer almıştır. Buna karşın deneyisel çalışmalarda ölçülen değerlerin doğruluğu önemli bir sorundur.

Deneysel çalışmalarda ölçülen değerlerde temel olarak iki tip hata ile karşılaşılabilir; (i) deney setinin ve ölçüm aletlerinin yapısından kaynaklanan hatalar, (ii) deneyi yapan kişiden kaynaklanan hatalar.

Deneyi yapan kişinin yapacağı hatalar, deneyim, planlama ve ön denemelerle minimize edilebilecekken, deney seti ve ölçüm aletlerinden kaynaklanan yapısal hataların belirlenerek deneysel sonuçlara yansıtılması ve bu şekilde deneysel değerlerin gerçekte uyumluluğunun artırılması gerekmektedir (Akpınar, 2005).

Özetle, deneysel belirsizlik ve hatalar, ekipman ve ölçüm aletlerinin seçiminden, çalışma durumundan, işlem koşullarından, kalibrasyonundan, ölçüm planlamasından, çevre koşullarından ve okumalardan dolayı ortaya çıkar (Midilli, 2003). Bu hata ve belirsizliklerin belirlenmesi için uygulanan analize “Belirsizlik Analizi” denir. Belirsizlik analizinin hem deneysel sonuçların yorumlanmasında, hem de sistem kurulumu öncesindeki tasarım çalışmalarında uygulanması gerekmektedir (Hepbaslı ve Akdemir, 2004).

Bu çalışmada, kullanılan tüm ölçüm aletlerinin yapısından kaynaklanan belirsizliğe dair bilgiler, ölçüm aletlerinin üreticilerinden alınmış, diğer hata ve belirsizlikler ise kabul edilmiştir.

Buna göre, sıcaklık ölçümü yapılan aletlerin duyarlılığı $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ve okuma hatası $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$; ürün nem içeriğinin belirlenmesi sırasında kullanılan analitik terazinin duyarlılığı $\pm 0,003$ g ve okuma hatası $\pm 0,001$ g; kurutma havası hızını ölçmek için kullanılan probun duyarlılığı $\pm 0,2$ m/s ve okuma hatası $\pm 0,05$ m/s. Hava rutubeti ölçüm aletlerinin duyarlılığı ± 2 RH ve okuma hatası $\pm 0,1$ RH. Ayrıca soğutucu akışkanın dolaştığı borulara basınç problemleri ile yüzey sıcaklığı ölçüm problemleri yerleştirilerek ölçümler alınmıştır. Basınç ve sıcaklık duyarlılıkları sırası ile $\pm 1,0$ ve $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ’dir.

Tüm bu duyarlık ve hata değerleri ile Holman (2001) tarafından tanımlanmış yöntem kullanılarak belirsizlik analizi yapılmıştır:

$$U_F = \left[\left(\frac{\partial F}{\partial z_1} u_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z_2} u_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial z_n} u_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.1)$$

Belirsizlik oranı belirlenecek olan parametrenin belirsizliği, ele alınan parametrenin hesaplanmasında kullanılan ve önceden deneysel olarak ölçülmüş olan diğer büyüklüklerin belirsizliği ile ilgidir. F , ele alınan parametrenin miktarını, u ilgili her parametrenin ölçümü yapılan aletin duyarlılık oranını, z ise belirsizlik oranı belirlenecek olan parametre ile ilgili olan diğer parametrelerin ölçüm oranını temsil etmektedir.

5. METODOLOJİ VE TERMODİNAMİK BAĞINTILAR

Termodinamiğin birinci yasası, “enerjinin korunumu”nu ifade ederken, ikinci yasası enerjinin niteliği ile ilgilidir. Enerjinin etkin kullanımı konusunda bilimsel anlamda yapılan çalışmalar, ikinci kanunun sistemlere uygulanabilirliği üzerine yoğunlaşmıştır. Özellikle 1970’li yıllarda ardı ardına gelen enerji krizleri, enerjinin daha bilinçli kullanımına dönük çalışmaları arttırmıştır. Birinci ve ikinci kanun analizleri sistemlerin verimliliğinin tespit edilmesi konusunda başvuru kaynağı olmuştur. Enerjinin işe dönüştürülemeyen bölümü, atık ısı olarak çevreye verileceğinden dolayı önem taşımayacaktır. Bu bakımdan, belirli bir halde ve miktardaki enerjinin yararlı iş potansiyeli gibi bir özeliğin tanımlanması çok yararlı olacaktır. Bu özellik, kullanılabilirlik veya kullanılabilir enerji diye de bilinen ekserjidir (Çengel ve Boles, 2008).

Ekserji kavramı ilk olarak Carnot tarafından 19. yy’da ortaya atılmış fakat fikrin endüstriyel sistemlere uygulanması ancak 20. yy’da gerçekleşmiştir. Ekserji analiz yöntemi 40 yılı aşkın süredir birçok araştırmacı tarafından bilimsel yayınlar ile geliştirilmiş ve desteklenmiştir. Böylece, ekserji analizi hızlı bir şekilde gelişmiş ve ekonomi (eksergoekonomik analiz), çevre (eksergoçevresel analiz) ile ilişkilendirilmesi fazla uzun sürmemiştir (Petrakopoulou, 2011).

Eksergoekonomi terimi ekserji ve ekonomik analizlerinin bir birleşimi olarak 1984 yılında Tsatsaronis tarafından literatüre tanıtılmış ve ilerleyen yıllarda birçok araştırmacı tarafından geliştirilmiştir.

5.1. Geleneksel Ekserji Analiz Yöntemi

Ekserji analizi ile bir sistemdeki tersinmezliklerin (entropi üretimi) yeri ve büyüklüğü tespit edilerek buralarda tersinmezlikleri azaltacak geliştirme ve iyileştirme çalışmaları yapılabilir.

Ekserji analizlerinin temel amacı ısı ve kimyasal sistemlerde eksiklerin önemini nicel tahmin etmek ve nedenlerini araştırmaktır. Ekserji analizleri, farklı termodinamik faktörlerin öneminin karşılaştırılması, proses etkileri üzerine termodinamik şartların etkilerinin iyi anlaşılması ve değerlendirilen prosesin

geliştirilmesinin en etkili yollarının tanımlanması için yol gösterir. Ekserjiyi doğru anlamak ve verimle sağlanabilecek bilgiler çevresel etki ve sürdürülebilir enerji sistemleri alanında çalışan araştırmacı ve mühendisler için gereklidir (Dinçer, 2002).

Ekserji analizi; ekserji yıkımlarının ve kayıplarının yerini, tipini ve miktarını doğru bir şekilde belirleyebildiği için sistemlerin tasarlanmasında ve geliştirilmesinde önemli rol oynar. Ekserji verimi ise, bir sistemin veya ele alınan prosesin ideal şartlara ne kadar yaklaştığının bir göstergesidir. Ayrıca bu yöntem ile ele alınan sistem veya prosesteki termodinamik verimsizliklerin düşülerek daha verimli sistem tasarımının nasıl yapılabileceğini ve mevcut şartların doğru bir şekilde tanımlanmasını sağlar.

5.1.1. Ekserji Analizi

Bir sistemin ekserji analizi yapılırken öncelikle tüm sistem bileşenleri için bileşen bazında daha sonrada tüm sistem için genel ekserji eşitlikleri oluşturulur. Bileşen seviyesinde ürün ekserji akımı ($\dot{E}_{P,k}$) birim zamanda elde edilen ekserji çıktısı olarak ve yakıt ekserji akımı ($\dot{E}_{F,k}$) birim zamanda istenilen ekserji çıktısını elde etmek için sağlanan gider olarak tanımlanabilir (Bejan ve diğ., 1996).

Yakıt ekserji akımı ve ürün ekserji akımı arasındaki fark ise sistemde birim zamanda meydana gelen ekserji yok oluşu veya ekserji yıkımı olarak belirtilir.

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{F,k} - \dot{E}_{P,k} \quad (5.1)$$

Birinci yasa verimi sisteme giren enerjinin ne kadar verimli kullanıldığının bir ölçüsü iken, ikinci yasa verimi sistemin tersinir bir çevrime ne kadar yakın olduğunun bir göstergesidir.

Ekserjetik verimlilik aşağıda verilen eşitlik ile ifade edilir:

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k}} = 1 - \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (5.2)$$

Ekserji analizinde, sistem içerisindeki bileşenlerin tüm sistem üzerindeki etkisini görebilmek için ekserjetik verimlilik dışında “geliştirme potansiyeli” (IP), “ekserjetik faktör” (f), “ekserji kayıp oranı” (y) ve “görelî tersinmezlik” (RI) gibi kavramlarda kullanılmaktadır.

Ekserji analizinin uygulanma amacına göre, uygulandığı işlem veya sistemdeki geliştirme olanaklarını belirlemek açısından geliştirilmiş olan “geliştirme potansiyeli” denklem (5.3) ile gösterilmektedir (Hammond ve Stapleton, 2001).

$$IP = (1 - \varepsilon)(\dot{E}_g - \dot{E}_ç) \quad (5.3)$$

ε ekserjetik verimliliği, $\dot{E}_g$ ve $\dot{E}_ç$ ise ele alınan bileşene giren ve çıkan ekserji akımını belirtmektedir. İlgili bileşenin tükettiği yakıtın toplam yakıt içerisindeki payını belirten “ekserjetik faktör” denklem (5.4) ile aşağıdaki gibi belirtilir.

$$f = \frac{\dot{E}_{F,k}}{\dot{E}_{F,toplam}} \cdot 100 \quad (5.4)$$

$\dot{E}_{F,k}$ ele alınan bileşen için ekserji akıt akımını ve $\dot{E}_{F,toplam}$ tüm sistemin toplam ekserji yakıt akımını belirtmektedir.

İlgili bileşenin ekserji yok oluş değerinin toplam yakıtı oranı “ekserji kayıp oranı” denklem (5.5) ile, “görelî tersinmezlik” ise ilgili bileşenin tersinmezliğinin toplam tersinmezlikler içerisindeki oranını belirten ve bu şekilde sistemdeki verimsizliklerin belirlenmesinde önemli bir araç olup denklem (5.6) ile belirtilmiştir.

$$y = \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{F,toplam}} \cdot 100 \quad (5.5)$$

$\dot{E}_{D,k}$ ele alınan bileşenin ekserji yıkım akımını ve $\dot{E}_{F,toplam}$ tüm sistemin toplam ekserji yakıt akımını belirtmektedir. $\dot{E}_{D,toplam}$ ise tüm sistem bileşenlerinin toplam ekserji yıkım akımını ifade etmektedir.

$$RI = \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{D,toplam}} \cdot 100 \quad (5.6)$$

5.1.2. Eksergoekonomik Analiz

Eksergoekonomik analiz, ekserji ve ekonomi terimlerini uygun bir biçimde birleştirir. Burada amaç; bir enerji çevrim sistemindeki masrafların, yatırım maliyetleri, enerji maliyetleri veya bakım onarım maliyetlerinin hangisinden en fazla etkilendiğini ortaya koymaktır.

Eksergoekonomik analiz, ısı sistemlerinin maliyet etkinliğini değerlendirme yolu ile sistemin iyileştirilmesi ve geliştirilmesi için kullanılmaktadır. Bir başka deyişle eksergoekonomik analiz yöntemi ısı sistemlerinde meydana gelen ekserji yıkımının maliyet miktarı ile ilişkisinin anlaşılmasına yardımcı olan bir analiz yöntemidir. Böylelikle sistemde bir iyileşme hedeflenmektedir.

Literatürde eksergoekonomik analiz türleri olarak Ekserji – Maliyet – Enerji – Kütle (EXCEM) adlı yöntem ile Özgül Ekserji Maliyetlendirme (SPECO) yöntemi bulunmaktadır (Rosen ve Dincer, 2003; Lazzaretto ve Tsatsaronis, 2006). Bu çalışmada SPECO modeli uygulanmıştır. Bu yöntem sık kullanılan eksergoekonomik analiz tekniklerinden biridir. Bu yöntemde öncelikle ele alınacak sistemin ekserji analizi yapılır. Daha sonra sistemde bulunan bileşenlere giren ve çıkan ekserji akımları belirlenir.

Her ekserji akımı için birim maliyet akımı (c_k) elde edilir. Daha sonra ise, ele alınan bileşenin birim maliyet akım değeri ile ekserji akım değerinin ($\dot{E}_k$) çarpımı sonucunda ekserji akımının maliyeti belirlenmiş olur.

$$\dot{C}_k = c_k \cdot \dot{E}_k \quad (5.7)$$

Geleneksel bir eksergoekonomik analiz uygulamasında her bir bileşen için maliyet denkliklerinin yazılması gerekmektedir:

$$\sum_g \dot{C}_k + \dot{Z}_k^T = \sum_\varphi \dot{C}_k + \dot{C}_k^W + \dot{C}_k^Q \quad (5.8)$$

Tüm sistem bileşenleri için denklikler yazıldıktan sonra bilinmeyen ekserji maliyet akım değeri yazılan denklik sayısından fazla ise eksergoekonomik hesabı gerçekleştirebilmek için ilave denklemlere ihtiyaç duyulur.

Çözüm için yeterli sayıda denklem yazılabilmesi için P kuralı (ürün ekserji akımı tarafında) ve F kuralı (yakıt ekserji akımı tarafında) yardımcı denklemlerin belirlenmesinde kullanılır. F kuralı; herhangi bir sistem alt bileşenine giren akımı, o bileşenin yakıtı olarak tanımlar ve bu akımın maliyetini bir önceki akışın ortalama ekserji maliyetlerine eşit olarak ifade eder. P kuralı ise; herhangi bir sistem bileşeninin “ürün” akımını, sisteme giren yakıt akımının maliyetine eşit kabul eder. Bu durumda çıkanlar hanesindeki toplam ekserji akımı sayısı, F ve P kuralı gruplarına ait çıkan ekserji akımlarının toplamına eşit olur. F ve P kuralı, m adet toplam çıkan ekserji sayısı için ihtiyaç duyulan $m-1$ adet denklemin ortaya çıkmasını sağlar (Lazzaretto ve Tsatsaronis, 2006).

Tüm sistem bileşenleri için gerekli denklimler çözüldüğünde her bir bileşen için birim maliyet akım değeri de elde edilmiş olunur. Ve eksergonomik analizinde önemli bir değerlendirme parametresi olan ekserji yıkım akımı maliyet değeri elde edilir:

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \cdot \dot{E}_{D,k} \quad (5.9)$$

Ekserji yıkım akımı maliyeti ($\dot{C}_{D,k}$) bir komponentte meydana gelen ekserji yıkımının o komponentin maliyeti ile ilişkilendirilmesini, ($c_{F,k}$) ise birim yakıt maliyet değerini ifade etmektedir.

Ekserji yıkım akımı maliyetinin hesaplanması sistem bileşenlerinin değerlendirilmesine ve yatırım maliyeti ($\dot{Z}_k$) ile ekserji yıkım akımı maliyetinin kıyaslanmasına olanak sağlar. Komponentler ilk olarak toplam maliyet değerlerine göre ($\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$) sıralanırlar. Yüksek maliyet değerine sahip olan bileşenler sistem içerisinde daha fazla öneme sahip olan bileşenlerdir.

Yatırım maliyetinin, $\dot{Z}_k$, toplam maliyete olan katkısının belirlenmesinde kullanılan parametre eksergoekonomik faktör (f_k), olarak belirtilir:

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}} \quad (5.10)$$

Eksergoekonomik faktör ele alınan bileşenin çalışma koşullarına bağlı olsa da, yüksek eksergoekonomik faktöre sahip olan bileşenler için yatırım maliyetinde

azaltmaya gidilmesi önerilir iken, düşük eksergoekonomik faktöre sahip olanlar için bileşende meydana gelen tersinmezliklerin giderilmesi önerilmektedir.

Yatırım maliyet değeri ($\dot{Z}_k^T$), anapara ($\dot{Z}_k^{CI}$), işletme ve bakım maliyetlerinin ($\dot{Z}_k^{OM}$), toplamıdır:

$$\dot{Z}_k^T = \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM} \quad (5.11)$$

$\dot{Z}_k^{CI}$, değerini hesaplamak için saatlik seviyelendirilmiş maliyet methodu kullanılır. Bunun için altı adımdan oluşan algoritma aşağıda verildiği gibi izlenmektedir;

Sistemin şimdiki parasal değeri, PW para miktarı olmak üzere, bu paranın n dilimlik periyotlarda, i bileşik faiziyle işletilmesi durumunda, eşitlik (5.12) kullanılarak sistemin şimdiki parasal değeri belirlenir.

$$PW_{sistem} = \dot{C}_{sistem} - \dot{S}_{sistem} PWF(i, n) \quad (5.12)$$

Bir sistemin kullanım yılı sonundaki hurda değeri, toplam ilk yatırım maliyeti ($\dot{C}_{sistem}$) üzerinden belirlenen bir hurda değer yüzdesine (j) bağlıdır ve eşitlik (5.13) ile ifade edilir (Kwak ve diğ., 2003; Ballı, 2008).

$$\dot{S}_{sistem} = \dot{C}_{sistem,j} \quad (5.13)$$

Paranın simdiki değeriyle gelecekteki değeri arasındaki fark ıskonto oranı olarak tanımlanır. Buna bağlı olarak paranın simdiki değer faktörü eşitlik (5.14) ile hesaplanmaktadır (Bejan ve diğ., 1996).

$$PWF = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (5.14)$$

Yıllık yatırım maliyeti ($\dot{CA}$) eşit zaman hareketlerinde meydana gelen eşit miktardaki para hareketleridir. Zaman aralığı olarak bir yıl kullanılır. Yakıt, çalışan ödemeleri gibi harcamaların yıllık ödemeleri eşitlik (5.15) kullanılarak hesaplanır (Bejan ve diğ., 1996).

$$\dot{CA}_{sistem} = PW_{sistem} CRF(i, n) \quad (5.15)$$

Bir yıllık ödemenin şimdiki değeri, belli bir dönem sonundaki yıllık ödeme toplamının efektif faiz oranıyla yıllık ödeme başlangıcında yatırılmış olması durumundaki parasal değeridir. İlk yatırım maliyetinin geri kazanım faktörü eşitlik (5.16) ile ifade edilir (Bejan ve diğ., 1996; Ballı, 2008).

$$CRF = \frac{i(i+1)^n}{(i+1)^n - 1} \quad (5.16)$$

GMIP kurutma sisteminin toplam yatırım maliyeti (Z_{GMIP}^T), eşitlik (5.17) kullanılarak hesaplanır.

$$\dot{Z}_{GMIP}^T = (1 + \varphi) \frac{CA_{GMIP}}{3600 \left(\frac{s}{h}\right) \tau \left(\frac{h}{yil}\right)} \quad (5.17)$$

τ , sistemin tam kapasitede toplam yıllık çalışma süresini φ ise bakım ve işletme maliyet faktörü ifade etmektedir. Tüm sistem bileşenleri için bakım ve işletme maliyet faktörü $\varphi=0,85$ olarak alınmıştır (Özdemir ve diğ., 2010).

Sistem elemanlarının maliyet değeri CR_k , eşitlik (5.18) ile hesaplanmaktadır. PEC satın alınan malzeme fiyatını belirtmektedir (Colpan, 2005; Colpan ve Yesin 2006; Ballı, 2008).

$$CR_k = \frac{PEC_k}{\sum_{GMIP} PEC} \quad (5.18)$$

Sisteme ait her bir bileşen için yıllık bakım-işletim maliyeti $\dot{Z}_k^{OM}$, eşitlik (5.19) ile hesaplanır (Ballı, 2008).

$$\dot{Z}_k^{OM} = \dot{Z}_k^{CI} \varphi \quad (5.19)$$

Eksergoekonomik analizinde sistem bileşenlerini değerlendirmede kullanılan bir diğer parametre de bağıl maliyet farkıdır (r_k).

$$r_k = \frac{c_{P,k} - c_{F,k}}{c_{F,k}} = \frac{\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k^T}{c_{F,k} \dot{E}_{P,k}} \quad (5.20)$$

Eşitlik (5.20) de $c_{P,k}$, bileşene ait birim ürün ekserji akım maliyetini ve $c_{F,k}$, bileşene ait birim yakıt ekserji akım maliyetini ifade etmektedir (Petrakopoulou, 2011).

Ekserji yıkım maliyeti ile bileşenlerin yatırım maliyetleri arasındaki ilişkinin eksergokonomik bağlamda değerlendirilmesi sistemin daha gelişmiş modellerinin tasarlanabilmesi açısından önem arz etmektedir. Buradaki amaç sistemden çıkan ürün maliyetinin azaltılmasıdır (Petrakopoulou ve diğ., 2013).

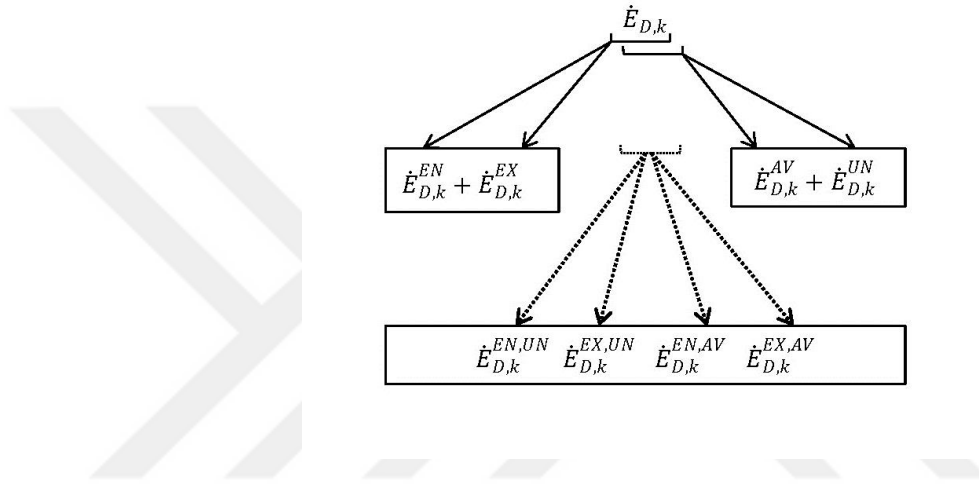
5.2.İleri Ekserji Analiz Yöntemi

Geleneksel ekserji analizi ile bir sistemde oluşan tersinmezliklerin sebepleri, yerleri ve büyüklükleri ile maliyete ve çevreye verdiği etkiler belirlenebilir ve sistem için genel bir iyileştirme önerilebilir. Fakat geleneksel ekserji analiz yöntemlerinin hiçbiri ile sistem bileşenleri arasındaki etkileşim sonucu oluşan tersinmezlikleri veya gerçekleştirilebilecek gerçek potansiyel iyileştirmeyi hesaplamada kullanılamaz. Özellikle birbirleri ile bağlantılı bir şekilde çalışan bileşenlerin oluşturduğu bir sistem ele alındığında bu etkileşimlerin hesaplamalara katılmaması yanlış yorumların yapılmasına sebep olabilmektedir. İleri ekserji analizi, bu eksiklikleri gidermek amacı ile geliştirilmiştir. İleri ekserji analiz yönteminde tüm sistem bileşenleri birbirleri ile ilişkilendirildiği için bu hataların ortaya çıkması engellenmiştir (Petrakopoulou, 2010).

Bir sistemde teknik olarak uygun tasarım ve/veya işletim iyileştirmeleriyle engellenebilecek olan ekserji yıkımı, maliyet ve çevresel etkiler *önlenebilir (AV)* olarak düşünülmektedir. Bir sistemdeki önlenebilir ekserji yıkım akım miktarının belirlenmesi sistemin geliştirilmesi için uygulanacak adımların tayininde dolayısıyla tüm sistemin iyileştirme potansiyelinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Geriye kalan ve hiçbir fiziksel, teknolojik gelişme ile yok edilemeyecek olan ekserji yıkımı da *önlenebilir (UN)* ekserji yıkımı olarak düşünülmektedir.

Ayrıca ekserji yıkımı, maliyet ve çevresel etkiler sebep oldukları kaynaklara göre parçalara ayrılabilirler; eğer ekserji yıkımı sistem bileşenlerinin birbirleri arasındaki etkileşim sonucu gerçekleşiyorsa *dış kaynaklı (EX)* ekserji yıkımı, eğer sistem bileşeninin kendi çalışma şartlarından kaynaklı bir yıkım söz konusu ise *iç kaynaklı (EN)* ekserji yıkımı olarak adlandırılmaktadır.

İç kaynaklı ve dış kaynaklı ekserji yıkım akımları değerlendirilerek bileşenler arasındaki etkileşim ve iyileştirme alternatifleri belirlenir. Tüm bunlara ek olarak önlenabilir ve önlenemez ekserji yıkımları da kendi içinde iç kaynaklı ve dış kaynaklı kısımlarına ayrılabilir. Ekserji yıkımlarının parçalara ayrılma yöntemi şematik olarak Şekil 5.1 de gösterilmektedir. Aynı ayırma işlemi maliyet (eksergoekonomik analiz) ve çevresel etkiler (yaşam döngüsü) içinde uygulanmaktadır.



Şekil 5.1. İleri ekserji analizinde bir bileşenin ekserji yıkım akımlarının iç kaynaklı/dışkaynaklı ve önlenebilir/önlenemez kısımlarına ayrılmasının şematik gösterimi (Kelly, 2008).

5.2.1. Ekserji Yıkımlarının Parçalarına Ayrılması

Bir sistemde ekserji yıkımlarını; bileşenin kendi çalışma şartlarından sonucu oluşan, iç kaynaklı ($\dot{E}_{D,k}^{EN}$) ekserji yıkımı ve diğer sistem bileşenlerinden kaynaklanan dış kaynaklı ($\dot{E}_{D,k}^{EX}$) ekserji yıkımı olarak ayırabilmek için öncelikle tüm sistemin çalışma şartlarının yeniden modifiye edilmesi gerekmektedir. Bir sistemdeki bileşenin iç kaynaklı ekserji yıkımını hesaplamak için ele alınan bileşenin çalışma şartları gerçek çalışma durumundaki ile aynı kabul edilir ve diğer sistem bileşenlerinin maksimum verimde (teorik) çalıştığı varsayımı yapılır. Buna göre bileşende oluşan ekserji yıkımı o bileşene ait iç kaynaklı ekserji yıkım değerini verir.

Dış kaynaklı ekserji yıkım akımı ise gerçek ekserji yıkım değerinden iç kaynaklı ekserji yıkım akımının çıkarılması ile elde edilir.

$$\dot{E}_{D,k}^{EX} = \dot{E}_{D,k}^{gerçek} - \dot{E}_{D,k}^{EN} \quad (5.21)$$

Daha önce de bahsedildiği gibi hiçbir fiziksel, teknolojik gelişme ile indirgenemeyecek olan ekserji yıkımı önlenemez ($\dot{E}_{D,k}^{UN}$) yıkım olarak tanımlanmaktadır.

Önlenemez ekserji yıkımının hesaplanabilmesi için sistemde bulunan bileşenlerin günümüz teknolojisine göre maksimum verimlilikte çalıştığı varsayımı yapılarak hesaplama yapılır. Örneğin kompresör ve türbinler için izantropik verim, ısı değiştiriciler için ise etkenlik tanımlanır.

Bu şartlara göre yeniden düzenlenen çalışma şartları ile tüm bileşenler için $\dot{E}_{D,k}^{UN}$ değeri hesaplanır. İlk olarak önlenemez ekserji yıkım akımı aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanır (Petrakopoulou, 2010).

$$\dot{E}_{D,k}^{UN} = \dot{E}_{P,k}^{gerçek} \cdot \left(\frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{P,k}} \right)^{UN} \quad (5.22)$$

Eşitlik (5.22)'de $\dot{E}_{P,k}^{gerçek}$, ele alınan sistem bileşeninin geleneksel ekserji analizi sonucu elde edilen ürün ekserji akımını, $\left(\frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{P,k}} \right)^{UN}$ ise önlenemez koşullarda hesaplanan ekserji yıkımının ürün ekserji akımına oranını ifade etmektedir.

Önlenebilir ($\dot{E}_{D,k}^{AV}$) ekserji yıkımı toplam ekserji yıkımından önlenemez kısım çıkartılarak aşağıda verildiği gibi hesaplanmaktadır (Petrakopoulou, 2010).

$$\dot{E}_{D,k}^{AV} = \dot{E}_{D,k}^{gerçek} - \dot{E}_{D,k}^{UN} \quad (5.23)$$

5.2.2. Önlenebilir ve Önlenebilir Ekserji Yıkımlarının İç ve Dış Kaynaklı Parçalarına Ayrılması

Tüm sistem bileşenleri için önlenebilir/önlenebilir ve iç kaynaklı/dış kaynaklı ekserji yıkım akımları bulunduğundan sonra bu değerler önlenebilir (avoidable-AV) ve önlenebilir (unavoidable-UN) ekserji yıkım değerleri ile ilişkilendirilerek faydalı yeni terimler elde edilir (Petrakopoulou, 2010):

- Önlenebilir iç kaynaklı ekserji yıkım akımı, $\dot{E}_{D,k}^{UN,EN}$

$$\dot{E}_{D,k}^{UN,EN} = \dot{E}_{P,k}^{EN} \cdot \left(\frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{P,k}} \right)^{UN} \quad (5.24)$$

Eşitlik (5.24)'de $\dot{E}_{P,k}^{EN}$, ele alınan sistem bileşeninin ileri ekserji analizinde iç kaynaklı koşulların uygulanması sonucunda elde edilen ürün ekserji akımını, $\left(\frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{P,k}} \right)^{UN}$ ise önlenebilir koşullarda hesaplanan ekserji yıkımının ürün ekserji akımına oranını ifade etmektedir.

Önlenebilir ekserji yıkım akımından önlenebilir iç kaynaklı ekserji yıkım akımı çıkarıldığında eşitlik (5.25) ile ifade edilen önlenebilir dış kaynaklı ekserji yıkım akımı hesaplanmaktadır.

- Önlenebilir dış kaynaklı ekserji yıkım akımı, $\dot{E}_{D,k}^{UN,EX}$

$$\dot{E}_{D,k}^{UN,EX} = \dot{E}_{D,k}^{UN} - \dot{E}_{D,k}^{UN,EN} \quad (5.25)$$

İç kaynaklı ekserji yıkım akımından önlenebilir iç kaynaklı ekserji yıkım akımı çıkarıldığında eşitlik (5.26) ile ifade edilen önlenebilir iç kaynaklı ekserji yıkım akımı hesaplanmaktadır.

- Önlenebilir iç kaynaklı ekserji yıkım akımı, $\dot{E}_{D,k}^{AV,EN}$

$$\dot{E}_{D,k}^{AV,EN} = \dot{E}_{D,k}^{EN} - \dot{E}_{D,k}^{UN,EN} \quad (5.26)$$

Önlenebilir ekserji yıkım akımından önlenebilir iç kaynaklı ekserji yıkım akımı çıkarıldığında eşitlik (5.27) ile ifade edilen önlenebilir dış kaynaklı ekserji yıkım akımı hesaplanmaktadır.

- Önlenebilir dış kaynaklı ekserji yıkım akımı, $\dot{E}_{D,k}^{AV,EX}$

$$\dot{E}_{D,k}^{AV,EX} = \dot{E}_{D,k}^{AV} - \dot{E}_{D,k}^{AV,EN} \quad (5.27)$$

5.3.İleri Eksergoekonomik Analiz Yöntemi

İleri eksergoekonomik analiz metodu, ileri ekserji analiz metodu ile benzerlik göstermektedir. İleri ekserji analizine benzer olarak ileri eksergoekonomik analizde de öncelikle geleneksel eksergoekonomik analiz yapılmalıdır.

İleri ekserji analizinde ekserji yıkım akımları parçalarına ayrılır iken ileri eksergoekonomik analizinde ise ekserji yıkım akım maliyetleri ($\dot{C}_{D,k}$) ve yatırım maliyetleri ($\dot{Z}_k$) bileşenin kendi çalışma şartlarından dolayı meydana gelen iç kaynaklı (EN) ve diğer bileşenlerin sebep olduğu dış kaynaklı (EX) şeklinde parçalara ayrılır. Ayrıca, maliyetin önlenebilir (AV) ve önlemez (UN) olması durumlarına göre de parçalara ayrılır. Analizin hesaplamalarında kullanılan eşitlikler, Çizelge 5.2 ile verilmiştir.

Çizelge 5.2. İleri eksergoekonomik analizinde kullanılan eşitlikler (Petrakopoulou ve diğ., 2013).

Terimler	Yatırım maliyeti ($\dot{Z}_k$)	Ekserji yıkım akımı maliyeti ($\dot{C}_{D,k}$)
$\dot{Z}_k^{EN}, \dot{C}_{D,k}^{EN}$	$\dot{Z}_k^{EN} = \dot{E}_{P,k}^{EN} \cdot \left(\frac{\dot{Z}}{\dot{E}_P} \right)_k^{gerçek}$	$\dot{C}_{D,k}^{EN} = c_{F,k} \cdot \dot{E}_{D,k}^{EN}$
$\dot{Z}_k^{EX}, \dot{C}_{D,k}^{EX}$	$\dot{Z}_k^{EX} = \dot{Z}_k^{gerçek} - \dot{Z}_k^{EN}$	$\dot{C}_{D,k}^{EX} = \dot{C}_{D,k}^{gerçek} - \dot{C}_{D,k}^{EN}$
$\dot{Z}_k^{UN}, \dot{C}_{D,k}^{UN}$	$\dot{Z}_k^{UN} = \left(\frac{PEC^{UN}}{PEC^{gerçek}} \right)_k \cdot \dot{Z}_k^{gerçek}$	$\dot{C}_{D,k}^{UN} = c_{F,k} \cdot \dot{E}_{D,k}^{UN}$
$\dot{Z}_k^{AV}, \dot{C}_{D,k}^{AV}$	$\dot{Z}_k^{AV} = \dot{Z}_k^{gerçek} - \dot{Z}_k^{UN}$	$\dot{C}_{D,k}^{AV} = \dot{C}_{D,k}^{gerçek} - \dot{C}_{D,k}^{UN}$
$\dot{Z}_k^{UN,EN}, \dot{C}_{D,k}^{UN,EN}$	$\dot{Z}_k^{UN,EN} = \dot{E}_{P,k}^{EN} \cdot \left(\frac{\dot{Z}_k^{UN}}{\dot{E}_P} \right)_k$	$\dot{C}_{D,k}^{UN,EN} = c_{F,k} \cdot \dot{E}_{D,k}^{UN,EN}$
$\dot{Z}_k^{UN,EX}, \dot{C}_{D,k}^{UN,EX}$	$\dot{Z}_k^{UN,EX} = \dot{Z}_k^{UN} - \dot{Z}_k^{UN,EN}$	$\dot{C}_{D,k}^{UN,EX} = \dot{C}_{D,k}^{UN} - \dot{C}_{D,k}^{UN,EN}$
$\dot{Z}_k^{AV,EN}, \dot{C}_{D,k}^{AV,EN}$	$\dot{Z}_k^{AV,EN} = \dot{Z}_k^{EN} - \dot{Z}_k^{UN,EN}$	$\dot{C}_{D,k}^{AV,EN} = \dot{C}_{D,k}^{EN} - \dot{C}_{D,k}^{UN,EN}$
$\dot{Z}_k^{AV,EX}, \dot{C}_{D,k}^{AV,EX}$	$\dot{Z}_k^{AV,EX} = \dot{Z}_k^{EX} - \dot{Z}_k^{UN,EX}$	$\dot{C}_{D,k}^{AV,EX} = \dot{C}_{D,k}^{EX} - \dot{C}_{D,k}^{UN,EX}$

İç kaynaklı yatırım maliyeti ($\dot{Z}_k^{EN}$) hesabında kullanılan $\dot{E}_{p,k}^{EN}$, değeri ele alınan bileşen gerçek çalışma şartlarında diğer sistem bileşenleri teorik şartlarda çalışırken elde edilen ekserji ürün akımını ifade eder. $\dot{E}_{p,k}^{gerçek}$ ve $\dot{Z}_k^{gerçek}$ gerçek çalışma koşullarındaki ekserji ürün akımını ve gerçek durumdaki yatırım maliyet değerini belirtir. Önenemez yatırım maliyeti ($\dot{Z}_k^{UN}$), ele alınan bileşenin günümüz teknolojik koşullarında olabilecek minimum maliyet değerini ifade eder, PEC_k^{UN} , önenemez koşullar için satın alınan bileşenin maliyetidir (Petrakopoulou ve diğ., 2013).

6. EKSERJİ ANALİZ YÖNTEMLERİNİN SİSTEME UYGULANMASI

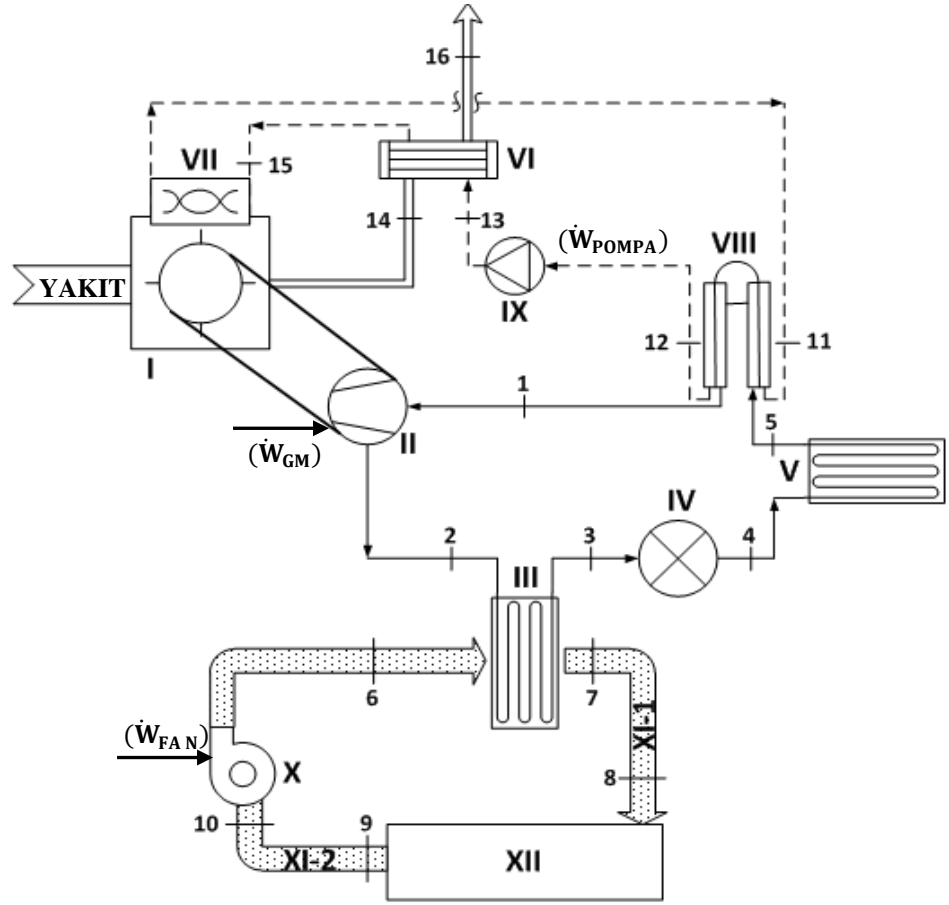
Bu çalışmada Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik laboratuvarında TÜBİTAK projesi (106M482) kapsamında kurulan “Gaz Motoru Tahrikli Isı Pompalı Bantlı Kurutucu Sistemi” için ekserji, eksergoekonomik, ileri ekserji ve ileri eksergoekonomik analizler yapılmıştır. Sistem temel olarak iki ana bölümden oluşmaktadır: (a) GMIP, (b) kurutma kanalları ve kabininden oluşan kurutma çemberi (KÇ), GMIP kurutucu sisteminin şematik olarak gösterimi Şekil 6.1 ile gösterilmiştir.

GMIP kurutucu sisteminde dolaşan, soğutma suyu, yakıt, giriş havası ve egzoz gazlarının izledikleri yol şematik gösterimde bulunmaktadır. Buna göre soğutma suyu sıcaklığı düşük olduğunda çevrim boyunca EGID, motor ve su pompasına girerek ısınır. Sıcaklığı artmaya başladığında ise ÇBID’ne girerek soğutucu akışkanın buharlaşmasına yardımcı olur. Sıcaklığı yüksek olduğunda, radyatöre girerek sıcaklığını uygun seviyeye getirir ve tekrar su pompasına döner. Böylece çevrim devam eder. Giriş havası susturucu ve hava temizleyicisinden geçtikten sonra yakıtla karışır ve böylece motor silindirlerine girerler. Yararlı ısınsının EGID’ne bırakan egzoz gazı daha sonra bacadan atmosfere salınır.

Egzoz gazının ısınsını salması ile oluşan yoğunlaşma sonucunda meydana gelen su drenaj ile dışarıya verilir.

6.1. Geleneksel Ekserji Analizi

GMIP kurutma sisteminde dolaşan çevrim akışkanlarının dolaşımı ve bu çevrim sırasında ekserji hesaplamalarında kullanılan noktalar Şekil 6.1 ile gösterilmiştir. Ayrıca sistemde dolaşan soğutucu akışkan, soğutma suyu, egzoz gazı ve hava gibi akışkanların izledikleri çevrimler gösterilmiş ve numaralandırılmıştır. Sistem parçalarının, ekserji denklıkları yazılırken ve hesaplamaları yapılırken bu numaralandırma esas alınmıştır.



I- Gaz Motoru
 III- Kondenser
 V- Evaporatör
 VII- SCIG
 IX- Su pompası
 XI- Kurutma kanalları

II- Kompresör
 IV- Genleşme vanası
 VI- EGID
 VIII- ÇBID
 X- Fan
 XII- Kurutma kabini

 Hava
 — Soğutucu akışkan
 - - - - - Soğutma suyu
 Egzoz havası

Şekil 6.1. GMIP kurutucu sisteminin şematik gösterimi.

Sistemdeki bileşenler için oluşturulan ekserji denklemleri için Şekil 6.1’de belirtilen numaralandırma esas alınmıştır.

Kompresör bileşeni için ekserji yakıt akımı gaz motorundan elde edilen işe eşittir ve eşitlik (6.1) ile belirtilmiştir.

$$\dot{E}_{F,KOMP} = \dot{W}_{GM,i} \quad (6.1)$$

Kompresör için ürün ekserji akımı kompresöre giren ve çıkan ekserji akımlarının farkı ile aşağıda verildiği gibi elde edilir.

$$\dot{E}_{P,KOMP} = \dot{E}_{2,r,act} - \dot{E}_{1,r} \quad (6.2)$$

Kompresör bileşeninin ekserji verimliliği ürün ekserji akımının yakıt ekserji akımına oranı ile eşitlik (6.3)’de ifade edilmiştir.

$$\varepsilon_{KOMP} = \frac{\dot{E}_{2,r,act} - \dot{E}_{1,r}}{\dot{W}_{GM,i}} \quad (6.3)$$

Kondenser bileşeni için ekserji yakıt akımı kondensere giren ve çıkan soğutucu akışkanın ekserji akımlarının farkı ile bulunur ve eşitlik (6.4) ile belirtilmiştir.

$$\dot{E}_{F,KOND} = \dot{E}_{2,r} - \dot{E}_{3,r} \quad (6.4)$$

Ürün ekserji akımı ise kondensere giren ve çıkan havanın ekserji akımlarının farkı ile aşağıda verildiği gibi elde edilir.

$$\dot{E}_{P,KOND} = \dot{E}_{7,a} - \dot{E}_{6,a} \quad (6.5)$$

Kondenser bileşeninin ekserji verimliliği ürün ekserji akımının yakıt ekserji akımına oranı ile eşitlik (6.6)’da ifade edilmiştir.

$$\varepsilon_{KOND} = \frac{\dot{E}_{7,a} - \dot{E}_{6,a}}{\dot{E}_{2,r} - \dot{E}_{3,r}} \quad (6.6)$$

Genleşme vanası için ekserji yakıt akımı bileşene giren soğutucu akışkanın ekserji akımı olarak eşitlik (6.7) ile ifade edilir.

$$\dot{E}_{F,GEN} = \dot{E}_{3,r} \quad (6.7)$$

Ürün ekserji akımı ise genleşme vanasından çıkan soğutucu akışkanın ekserji akımı olarak aşağıda verildiği gibi elde edilir.

$$\dot{E}_{P,GEN} = \dot{E}_{4,r} \quad (6.8)$$

Genleşme vanası bileşeninin ekserji verimliliği ürün ekserji akımının yakıt ekserji akımına oranı ile eşitlik (6.9) ile ifade edilmiştir.

$$\varepsilon_{GEN} = \frac{\dot{E}_{4,r}}{\dot{E}_{3,r}} \quad (6.9)$$

Isı değiştiricileri için ekserji verimliliği birçok şekilde ifade edilebilir (Hepbaşlı, 2008). Bu bağlamda, Kotas (1995) tarafından çalışma sıcaklığı aralığının ısı değiştiricilerinin performansına olan etkisini ortaya koymak için eşitlik (6.10) ve (6.12) türetilmiştir.

$T_{1,m}$ ve $T_{2,m}$ akımların ortalama sıcaklık değerini, T_0 ise ölü hal durumundaki sıcaklık değerini ifade eder ve $\Delta T < T_{1,m}$ iken $\Delta T = T_{1,m} - T_{2,m}$ varsayımı yapılmaktadır. Evaporatör bileşeni için ekserji yakıt akımı eşitlik (6.10) ve ürün ekserji akımı eşitlik (6.11) ile ifade edilmektedir.

$$\dot{E}_{F,EVAP} = \frac{T_{1,m} - T_0}{T_{1,m}} + T_0 \frac{\Delta T}{T_{1,m}^2} \quad (6.10)$$

$$\dot{E}_{P,EVAP} = \dot{E}_{5,r} - \dot{E}_{4,r} \quad (6.11)$$

Evaporatör bileşeninin ekserji verimliliği ürün ekserji akımının yakıt ekserji akımına oranı ile eşitlik (6.12) ile ifade edilmiştir.

$$\varepsilon_{EVAP} = 1 - \frac{2T_0 \frac{\Delta T}{T_{1,m}^2}}{\frac{T_{1,m} - T_0}{T_{1,m}} + T_0 \frac{\Delta T}{T_{1,m}^2}} \quad (6.12)$$

ÇBID bileşeni için ekserji yakıt akımı bileşene giren ($\dot{E}_{11,w}$) ve çıkan ($\dot{E}_{12,w}$) soğutma suyunun ekserji akımlarının farkına eşittir ve eşitlik (6.13) ile aşağıda ifade edilmiştir.

$$\dot{E}_{F,\text{ÇBID}} = \dot{E}_{11,w} - \dot{E}_{12,w} \quad (6.13)$$

ÇBID için ekserji ürün akımı eşitlik (6.14) ile verilmiştir. $\dot{E}_{1,r}$, ÇBID'den çıkan soğutucu akışkanın ekserji akımını, $\dot{E}_{5,r}$ ise ÇBID'ne giren soğutucu akışkanın ekserji akımını ifade etmektedir.

$$\dot{E}_{P,\text{ÇBID}} = \dot{E}_{1,r} - \dot{E}_{5,r} \quad (6.14)$$

ÇBID, soğutucu akışkan ve motor soğutma suyunun birbirine temas ederek ısı transferini gerçekleştirdikleri ısı değiştiricisidir ve ekserji verimliliği aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\varepsilon_{\text{ÇBID}} = \frac{\dot{E}_{1,r} - \dot{E}_{5,r}}{\dot{E}_{11,w} - \dot{E}_{12,w}} \quad (6.15)$$

Kurutma kabini için ekserji yakıt akımı kabine giren kurutma havasının ekserji akımı ile eşitlik (6.16) ile verilmiştir. $\dot{E}_{8,a}$, kabine giren kurutma havasının ekserji akımını ifade etmektedir.

$$\dot{E}_{F,K.KABİNİ} = \dot{E}_{8,a} \quad (6.16)$$

Kurutma kabini için ekserji ürün akımı kabinden çıkan kurutma havasının ekserji akımı ile üründen uzaklaştırılan suyun ekserji akımının toplamı ile eşitlik (6.17)'de verilmiştir. $\dot{E}_{9,a}$, kabinden çıkan kurutma havasının ekserji akımını, $\dot{E}_{evap}$, üründen uzaklaştıran suyun ekserji akımını ifade etmektedir.

$$\dot{E}_{P,K.KABİNİ} = \dot{E}_{9,a} + \dot{E}_{evap} \quad (6.17)$$

Kurutma kabini için ekserji verimliliği ürün ekserji akımının yakıt ekserji akımına oranı ile eşitlik (6.18) ile ifade edilmiştir.

$$\varepsilon_{K.KABİNİ} = \frac{\dot{E}_{9,a} + \dot{E}_{evap}}{\dot{E}_{8,a}} \quad (6.18)$$

Kurutma kanalı I için yakıt ekserji akımı aşağıda verildiği gibidir. $\dot{E}_{7,a}$, kanal I'e giren kurutma havasının ekserji akımını ifade etmektedir.

$$\dot{E}_{F,K.KANALI I} = \dot{E}_{7,a} \quad (6.19)$$

Kurutma kanalı I için ürün ekserji akımı eşitlik (6.20)'de verildiği gibidir. $\dot{E}_{8,a}$, kanal I'den çıkan kurutma havasının ekserji akımını ifade etmektedir.

$$\dot{E}_{P,K.KANALI I} = \dot{E}_{8,a} \quad (6.20)$$

Kurutma kanalı I için ekserji verimliliği ürün ekserji akımının yakıt ekserji akımına oranı ile eşitlik (6.21) ile ifade edilmiştir.

$$\varepsilon_{K.KANALI I} = \frac{\dot{E}_{8,a}}{\dot{E}_{7,a}} \quad (6.21)$$

Kurutma kanalı II için yakıt ekserji akımı aşağıda verildiği gibidir. $\dot{E}_{9,a}$, kanal II'ye giren kurutma havasının ekserji akımını ifade etmektedir.

$$\dot{E}_{F,K.KANALI II} = \dot{E}_{9,a} \quad (6.22)$$

Kurutma kanalı II için ürün ekserji akımı eşitlik (6.23)'de verildiği gibidir. $\dot{E}_{10,a}$, kanal II'den çıkan kurutma havasının ekserji akımını ifade etmektedir.

$$\dot{E}_{P,K.KANALI II} = \dot{E}_{10,a} \quad (6.23)$$

Kurutma kanalı II için ekserji verimliliği ürün ekserji akımının yakıt ekserji akımına oranı ile eşitlik (6.24) ile ifade edilmiştir.

$$\varepsilon_{K.KANALI II} = \frac{\dot{E}_{10,a}}{\dot{E}_{9,a}} \quad (6.24)$$

Fan bileşeni için ekserji yakıt akımı fanın çalışması için gerekli olan işe eşittir ve eşitlik (6.25) ile belirtilmiştir.

$$\dot{E}_{F,FAN} = \dot{W}_{FAN} \quad (6.25)$$

Fan için ürün ekserji akımı fana giren ve çıkan kurutma havasının ekserji akımlarının farkı ile aşağıda verildiği gibi elde edilir. $\dot{E}_{10,a}$, fana giren havanın ekserji akımını belirtir iken $\dot{E}_{6,a}$ çıkan havanın ekserji akımını ifade etmektedir.

$$\dot{E}_{P,FAN} = \dot{E}_{6,a} - \dot{E}_{10,a} \quad (6.26)$$

Fanın ekserji verimliliği ürün ekserji akımının yakıt ekserji akımına oranı ile eşitlik (6.27) ile ifade edilmiştir.

$$\varepsilon_{FAN} = \frac{\dot{E}_{6,a} - \dot{E}_{10,a}}{\dot{W}_{FAN}} \quad (6.27)$$

6.2. Geleneksel Eksergoekonomik Analizi

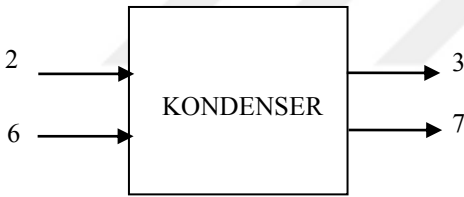
Sistemin eksergoekonomik analizinin yapılabilmesi için sistem bileşenlerinin, bakım– onarım maliyetlerinin ve yatırım maliyetlerinin bilinmesi gerekir. Bu bilgiler Çizelge 6.1 de gösterilmiştir. Bu çalışmadaki sistem için τ , i , j ve n parametreleri sırası ile 4380 saat/yıl, % 18, 0,12 ve 15 yıl olarak alınmıştır. Ayrıca GMIP kurutucu sistemindeki komponentler için kullanılan ekserji ve maliyet denklikleri ile yardımcı denklemler Çizelge 6.2 de verilmiştir.

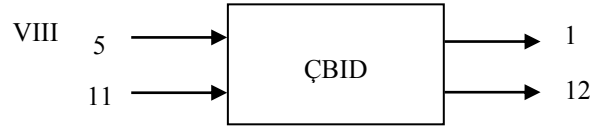
Çizelge 6.1. Satın alınan komponent maliyetleri ile seviyelendirilmiş ilk yatırım, bakım-onarım ve toplam maliyet akımı.

No	Bileşen	PEC (\$)	$\dot{Z}_k^{CI}$ (\$/h)	$\dot{Z}_k^{OM}$ (\$/h)	$\dot{Z}_k^T$ (\$/h)
II	Kompresör	1266	0,092	0,079	0,171
III	Kondenser	1108	0,081	0,069	0,150
IV	Genleşme vanası	253	0,018	0,016	0,034
V	Evaporatör	949	0,069	0,059	0,128
VIII	ÇBİD	285	0,021	0,018	0,038
X	Fan	443	0,032	0,027	0,060
XI	Kurutma kanalları	316	0,023	0,020	0,043
XII	Kurutma kabini	4747	0,347	0,295	0,641

Bu bilgiler ışığında sistemin her bir bileşeni için ekserji ve eksergoekonomik denge denklemleri yazılır.

Çizelge 6.2. GMIP kurutucu sistemi için geleneksel ekserji ve eksergoekonomik eşitlikleri.

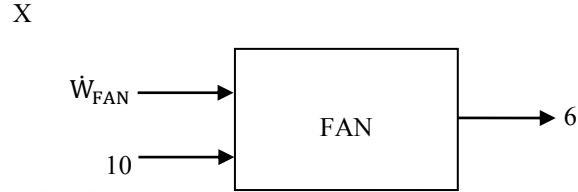
No.	Kontrol hacmi	Ekserji/Eksergoekonomik denklemler
II		$\dot{W}_{GM} + \dot{E}_1^r - \dot{E}_2^r = \dot{E}_{D,KOMP}$ $\dot{C}_{GM}^W + \dot{C}_1^r + Z_{KOMP}^T = \dot{C}_2^r$
III		$\dot{E}_2^r + \dot{E}_6^a - \dot{E}_3^r - \dot{E}_7^a = \dot{E}_{D,KOND}$ $\dot{C}_2^r + \dot{C}_6^a + Z_{KOND}^T = \dot{C}_3^r + \dot{C}_7^a$ $c_3 = c_2 \text{ (F kuralı)}$
IV		$\dot{E}_3^r - \dot{E}_4^r = \dot{E}_{D,GEN}$ $\dot{C}_3^r + Z_{GEN}^T = \dot{C}_4^r$
V		$\dot{E}_4^r - \dot{E}_5^r = \dot{E}_{D,EVAP}$ $\dot{C}_4^r + Z_{EVAP}^T = \dot{C}_5^r$



$$\dot{E}_5^r + \dot{E}_{11}^{cw} - \dot{E}_{12}^{cw} - \dot{E}_1^r = \dot{E}_{D,\text{ÇBID}}$$

$$\dot{C}_{11}^{cw} + \dot{C}_5^r + Z_{\text{ÇBID}}^T = \dot{C}_{12}^{cw} + \dot{C}_1^r$$

$$c_{11}=c_{12} \text{ (F kuralı)}$$



$$\dot{W}_{FAN} + \dot{E}_{10}^a - \dot{E}_6^a = \dot{E}_{D,FAN}$$

$$\dot{C}_{FAN}^W + \dot{C}_{10}^a + Z_{FAN}^T = \dot{C}_6^a$$



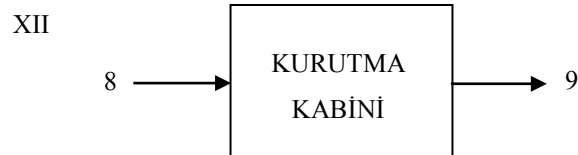
$$\dot{E}_7^a - \dot{E}_8^a = \dot{E}_{D,K.KANALI}$$

$$\dot{C}_7^a + Z_{K.KANALI}^T = \dot{C}_8^a$$



$$\dot{E}_9^a - \dot{E}_{10}^a = \dot{E}_{D,K.KANALI}$$

$$\dot{C}_9^a + Z_{K.KANALI}^T = \dot{C}_{10}^a$$



$$\dot{E}_8^a - \dot{E}_9^a = \dot{E}_{D,K.KABİNİ}$$

$$\dot{C}_8^a + Z_{K.KABİNİ}^T = \dot{C}_9^a$$

Sisteme ait kurulan eksergoekonomik denklemler çözülerek, GMIP kurutucu sisteminde bütün noktalar için maliyet akımları $\dot{C}$ (\$/h) ve birim ekserji maliyeti c (\$/GJ) hesaplanabilir.

Bu değerlerin de elde edilmesiyle sistemin her bir bileşeni için yakıt ekserjisi (kW), ürün ekserjisi (W), ekserji yıkım akımı (kW), ekserji verimi, ekserji kayıp oranı, birim yakıt ekserjisi maliyeti (\$/GJ), birim ürün ekserjisi maliyeti (\$/GJ), eksergoekonomik faktör, bağıl maliyet farkı ve toplam yatırım maliyeti değerlerine (\$/h) ulaşılır (Açıkkalp ve diğ., 2014c).

6.3.İleri Ekserji Analizi

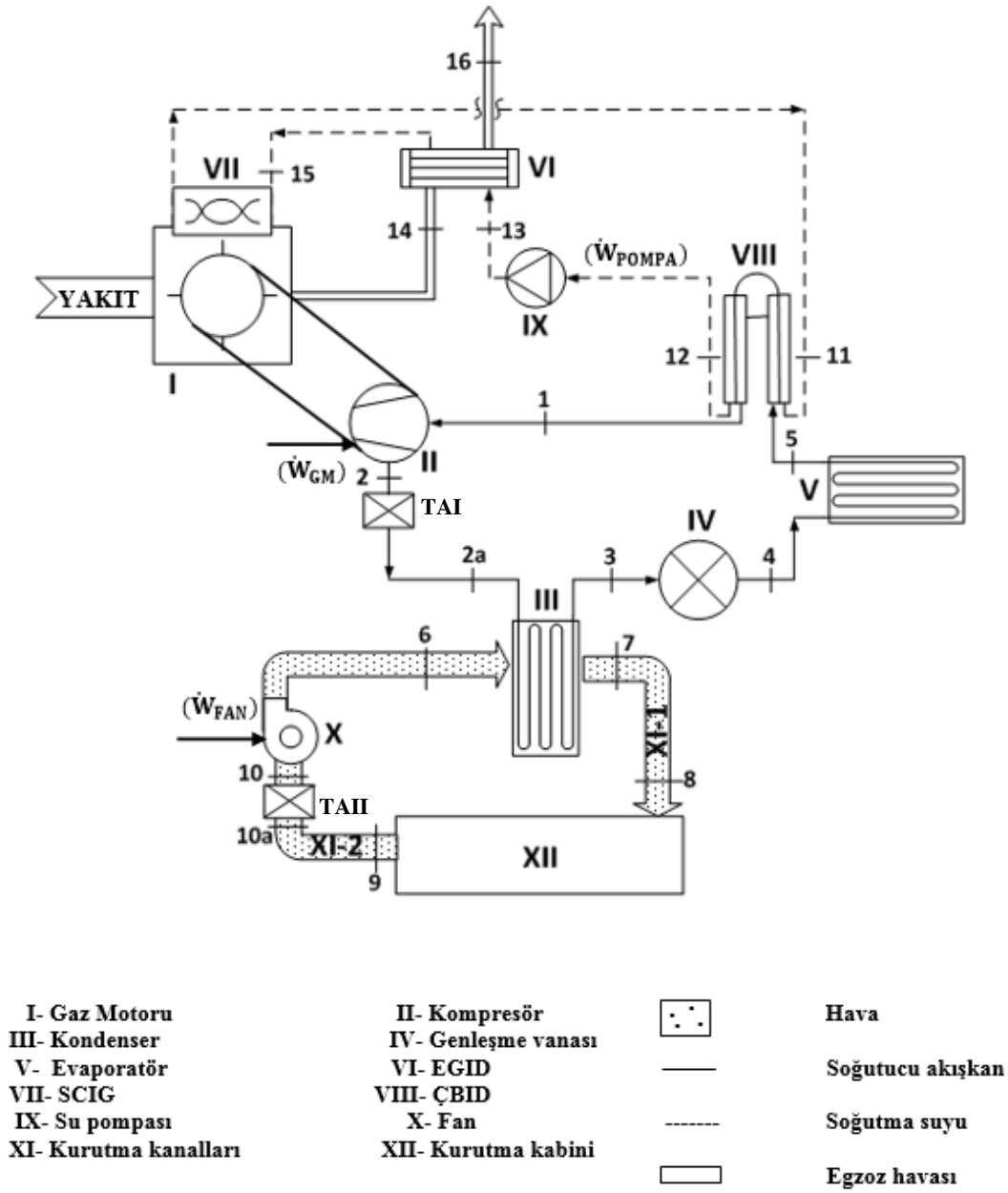
Bir bileşende meydana gelen ekserji yıkımının önlenabilir ve önlenemez kısımlarına ayrılması o bileşenin verimliliğinin artırılabilme potansiyelinin etkili bir biçimde ölçülmesine olanak sağlar. Ekserji yıkımının, temin edilebilirlik, malzeme maliyetleri ve üretim yöntemleri gibi teknolojik kısıtlardan kaynaklanan kısmı önlenemez ekserji yıkımı ($\dot{E}_{D,k}^{UN}$) olarak geri kalan kısım ise önlenabilir ekserji yıkımı ($\dot{E}_{D,k}^{AV}$) olarak tanımlanır. Sisteme ait bileşenlerin önlenemez ekserji yıkım hesapları tüm bileşenlerin en uygun çalışma şartlarında oldukları varsayımı ile yapılmaktadır. Bu şartlar sistem bileşenlerinde minimum ekserji yıkımı ile düşük basınç kayıpları ve sıcaklık farklılıklarını içermektedir. Çizelge 6.3’de GMIP kurutucu sisteminin ileri ekserji analizi için yapılan önlenemez ekserji yıkımı akımı ve teorik şartları belirten kabuller ile gerçek (çalışma) koşullar gösterilmiştir.

Çizelge 6.3. GMIP kurutucu sisteminin gerçek, teorik ve önlenemez çalışma koşulları.

Bileşen	$\dot{E}_{D,k}^{gerçek}$	Teorik Kabuller	Önlenemez Koşullar
Kompresör	$\eta_{is} = \%87$	$\eta_{is} = \%100$	$\eta_{is} = \%98$
Kondenser	$\Delta T_{min} = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta P = \%0,97$	$\Delta T_{min} = 5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta P = \%0$	$\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta P = \%1$
Genleşme vanası	$\eta_{is} = \%0,95$	$\eta_{is} = \%100$	$\eta_{is} = \%0,01$
Evaporatör	$\Delta T_{min} = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta P = \%0$	$\Delta T_{min} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta P = \%0$	$\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta P = \%1$
ÇBİD	$\Delta T_{min} = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta P = \%0$	$\Delta T_{min} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta P = \%0$	$\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta P = \%1$
Kurutma kabini	$\Delta T_{min} = 0,86\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{min} = 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$
Kurutma kanalları	$\Delta T_{min} = 9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{min} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$

Çizelge 6.3’de $\dot{E}_{D,k}^{gerçek}$, sistem bileşenleri deneysel çalışma şartlarında çalışmaya devam ederken sahip oldukları sıcaklık, basınç farkı ve izantropik verim değerini ifade etmektedir. Teorik kabuller ise tüm sistem bileşenlerinin teorik şartlar altında çalışması varsayımı elde edilen sıcaklık, basınç farkı ve izantropik verim değerini ifade etmektedir. Önlenebilir koşullar kabulünde belirtilen sıcaklık, basınç farkı ve izantropik verim değerleri ise sistem teknik bilgileri ve sistem üzerindeki tecrübelerle dayanılarak yapılmıştır (Tan ve Keçebaş, 2014). Ayrıca ileri ekserji analizi hesaplamaları yapılırken tüm sistemin ekserjetik ürün değerinin sabit kaldığı varsayımı yapılmıştır. Yani gerçek değeri (deneysel şartlar) ile aynı değerde alınmıştır.

Şekil 6.2’de GMIP kurutucu sistemin ileri ekserji analiz kabulleri uygulandıktan sonraki şematik gösterimi verilmiştir. Deneysel koşullardaki gösterimden (Şekil 6.1) farklı olarak sisteme iki adet tersinir adyabatik ısıtıcı (TAI) eklenmiştir. Buradaki amaç ileri ekserji analiz kabulleri sebebi ile kompresör veya kurutma kanalından kaynaklı kondenserde meydana gelebilecek tersinmezliklerin etkisini önlemektir. Şekil 6.2’de görülen TAI I, ısı pompası ünitesinde ve kompresör ile kondenser arasında yerleştirilen farazi bir bileşendir. Bu sayede TAI I (hal 2a) çıkışındaki akım sıcaklığı, gerçek (deneysel) sıcaklık değeri aynı kalmaktadır $T_7 = T_{2a} + \Delta T_{KOND}$. Kondenserdeki önlenebilir ve önlenebilir ekserji yıkımlarını hesaplarken sıcaklık farkı $\Delta T_{KOND} = 5^\circ\text{C}$ ve basınç düşüşü $\Delta P_{KOND} = \%1$ olarak alınmıştır. Tersinir adyabatik ısıtıcı (TAI II) kurutma sisteminde bulunan kurutma kanalı ile fan arasına yerleştirilmiş diğer bir farazi bileşendir.



Şekil 6.2. GMIP kurutucu sisteminin ileri ekserji analiz kabulleri ile şematik gösterimi.

6.4.İleri Eksergoekonomik Analizi

Geleneksel ekserji temelli analizi metodlarda sistem bileşenlerinde yüksek tersinmezliğe sahip olanlar belirlenebilmektedir. Fakat bu tersinmezlikleri iç yüzü veya sebepleri tam olarak ifade edilemez.

Bu sebeple bir proseste veya bileşende ekserji yok oluşunun nasıl olduğunu anlamak önem arz etmektedir. İleri ekserji temelli analiz metodu olarak adlandırılan yöntem ile ekserji yıkımı, ekserji yıkım maliyeti, yatırım maliyet değerleri iç kaynaklı/dış kaynaklı ve önlenebilir/önlenemez kısımlarına ayrılmaktadır. İleri ekserji temelli analiz yönteminin amacı (a) önlenebilir termodinamik tersinmezlikleri, maliyetleri ve çevresel etkileri ortaya çıkararak bir proseste veya bileşende yapılabilecek potansiyel iyileştirmeleri göstermek (b) iç kaynaklı ve dış kaynaklı termodinamik tersinmezlikleri, maliyetleri ve çevresel etkilerin büyüklüklerini hesaplayarak bir sistemdeki bileşenin diğer bileşenler üzerindeki etkisinin ölçüsünü ortaya koymaktır. Bu metodun uygulanmasındaki son amaç ise analiz sonuçlarının ortaya koyduğu veriler doğrultusunda proses veya bileşen üzerinde gerekli iyileştirilmelerin yürütülmesidir. İleri ekserji temelli analiz metodların uygulaması sırasında geleneksel ekserji analiz sonuçları başlangıç verisi olarak kullanıldığı için bu metod dikkatli bir şekilde tanımlanması gereken aşamalardan oluşmaktadır. Bu sebeple bir sistemin ileri ekserji ve ileri eksergoekonomik analizleri yapılmadan önce geleneksel ekserji ve eksergoekonomik analizleri yapılmalıdır.

Bu doktora tezinde ileri eksergoekonomik analiz, bileşenlerin maliyet değerlerinin (yatırım, çalışma, bakım-onarım maliyetleri, $\dot{Z}$) parçalarına ayrılmasında, ekserji yıkım akımı maliyeti $\dot{C}$, ile ilişkili kısmının iç kaynaklı/dış kaynaklı (EN/EX) ve önlenebilir/önlenemez (AV/UN) parçalarına ve kombinasyonlarına ayrılmasında kullanılmaktadır.

İç kaynaklı/dış kaynaklı maliyetleri, yatırım maliyetleri ve ekserji yıkım maliyetlerini her bir bileşen için bileşenin kendi çalışma şartlarından kaynaklanan (iç kaynaklı) ve diğer sistem bileşenlerinin (dış kaynaklı) tersinmezliklerinden kaynaklanan şeklinde hesaplamak için maliyetler parçalarına ayrılır. Bir bileşenin maliyet ile ilgili olan iç kaynaklı kısmı, tüm sistem bileşenleri teorik çalışma şartlarında çalışırken ele alınan bileşen gerçek çalışma şartlarında iken hesaplanır. Gerçek yatırım maliyet değerleri ve gerçek ekserji yıkım maliyet değerlerinden iç kaynaklı kısmın çıkarılması ile her bir bileşen için dış kaynaklı kısım elde edilir.

Ayrıca, her bir bileşenin ekonomik açıdan gerçek potansiyel iyileştirme değerlendirilmesinin yapılabilmesi için ekserji yıkım maliyet değerleri ve yatırım maliyet değerleri maliyetin önlenabilir veya önlenemez olabilme durumlarına göre önlenebilir ve önlenemez kısımlarına ayrılır. Önlenemez ekserji yıkım değeri ($\dot{E}_{D,k}^{UN}$) ile ekserjetik ürün değeri ele alınan bileşen için gerçek çalışma şartlarında elde edilir. Önlenemez ekserji yıkım maliyet değeri ($\dot{C}_k^{UN}$) ve önlenemez yatırım maliyet değeri ($\dot{Z}_k^{UN}$) Çizelge 5.2'deki eşitlikler kullanılarak elde edilir. Toplam gerçek maliyet değerlerinden önlenemez maliyetler çıkarıldığında önlenebilir maliyet değerleri elde edilir. Önlenebilir ve önlenemez yatırım maliyetlerini hesaplamak için Çizelge 6.4 de gösterilen çalışma şartları kullanılarak sistem simüle edilir. Maliyetlerin iç kaynaklı çalışma şartlarından ve bileşenlerin etkileşimlerinden kaynaklandığını daha iyi anlayabilmek için önlenemez dış kaynaklı ve önlenebilir dış kaynaklı kısımlarına ayrılır.

Çizelge 6.4. GMIP kurutucu sistemi için önlenemez yatırım maliyetleri.

Bileşen	$\dot{Z}_k^{UN}$ (çalışma koşulları veya % $\dot{Z}_k^{gerçek}$)
Kompresör	%85
Kondenser	$\Delta T_{min} = 5 \text{ K}, \Delta P_{UN} = \Delta P_{gerçek}$
Genleşme vanası	%100
Evaporatör	$\Delta T_{min} = 3 \text{ K}, \Delta P_{UN} = \Delta P_{gerçek}$
ÇBİD	$\Delta T_{min} = 27 \text{ K}, \Delta P_{UN} = \Delta P_{gerçek}$
Kurutma kabini	%90
Kurutma kanalları	%90

7. BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

GMIP kurutucu sistemi için geleneksel ekserji analizi sonuçları Çizelge 7.2, 7.3, 7.4, 7.5 ile ve ileri ekserji analiz sonuçları Şekil 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 ve Çizelge 7.6 ile verilmiştir. Tüm çizelgelerdeki numaralandırmalar GMIP kurutucu sistemin şematik gösterimi (Şekil 6.1 ve Şekil 6.2) esas alınarak yapılmıştır. Ayrıca, önlenemez ekserji yıkımlarının hesaplanabilmesi için yapılan kabuller Çizelge 6.3 ile verilmiştir.

Çizelge 7.1’de belirsizlik analizi sonuçları verilmiştir. Belirsizlik analizinde sistem bileşenleri içerisinde evaporatör bileşeni rastgele seçilmiştir. Nominal değerler evaporatör bileşeninin deneysel veriler kullanılarak hesaplanan değerleridir. Beklenen değerler ise ele alınan bileşen için eşitlik (4.1) kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılmış olan belirsizlik analizi kurutma sistemindeki deneysel belirsizliklerin kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermiştir.

Çizelge 7.1. Kurutma deneyleri sırasındaki ölçümlerin belirsizlikleri ve beklenen değerlerin toplam belirsizliği.

Parametre	Birim	Sonuç
Deneysel ölçümler		
Sıcaklık ölçümündeki belirsizlik	°C	$\pm 0,224$
Kütle kayıplarının ölçümündeki belirsizlik	g	$\pm 0,0032$
Hava hızı ölçümündeki belirsizlik	m/s	$\pm 0,21$
Havadaki rutubetin ölçümündeki belirsizlik	%	$\pm 0,41$
Basınç ölçümündeki belirsizlik	kPa	$\pm \%1,0$
Yüzey sıcaklığı ölçümündeki belirsizlik	°C	$\pm 0,1$
Beklenen Değerler		
$\dot{E}_g$ için toplam belirsizlik		$\pm \%^a0,56$
$\dot{E}_\phi$ için toplam belirsizlik		$\pm \%^b0,51$
ε için toplam belirsizlik		$\pm \%^c0,85$

^a Nominal değer 0,501 kW olarak alınmıştır.

^b Nominal değer 0,449 kW olarak alınmıştır.

^c Nominal değer % 89,64 olarak alınmıştır.

Çizelge 7.2’de belirtilen kütleli debiler ve sıcaklık değeri sistem üzerinden deneysel olarak ölçölmüş, entalpi ve entropi değeri ise deneysel veriler kullanarak EES programı ile hesaplanmıştır. Isıl özgül ekserji akımı e^T , ele alınan akımın basınç değeri ölü hal durumunda olması halinde ve mekanik özgül ekserji akımı e^M , ele alınan akımın sıcaklık değeri ölü hal durumunda olması halinde hesaplanmıştır. Fiziksel özgül ekserji akımı e^{PH} , mekanik ve ısı özgül ekserji akımlarının toplamı ile elde edilir.

Çizelge 7.3’de belirtilen kütleli debi, sıcaklık, basınç ve özgül ekserji akım değeri sistem üzerinde önlenemez koşullar uygulandıktan sonra sistemin tekrar dengeye getirilmesi ile hesaplanan değeri dir. Çizelge 7.4’de ise GMIP kurutucu sisteminin geleneksel ekserji analiz sonuçları verilmiştir. Geleneksel ekserji analizi Çizelge 7.2’de belirtilen deneysel olarak ölçölmüş veriler ile yapılmıştır.

Çizelge 7.2. GMIP kurutucu sisteminde deneysel veriler ile elde edilen bazı termodinamik değerler.

Akışkan	Hal	m (kg/s)			T (°C)			h (kJ/kg)			s (kJ/kg K)			e^T (kJ/kg)			e^M (kJ/kg)			e^{PH} (kJ/kg)		
		1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c
Soğutucu Akışkan	1	0,091	0,096	0,088	23,00	23,20	21,00	278,90	279,00	277,70	1,000	1,000	1,000	0,407	0,323	0,122	55,87	56,06	54,96	56,28	56,8	55,08
Soğutucu Akışkan	2	0,091	0,096	0,088	71,10	70,00	69,10	305,10	304,30	304,40	1,009	1,008	1,011	-	-	-	-	-	-	79,93	79,41	78,66
Soğutucu Akışkan	3	0,091	0,096	0,088	50,70	50,50	49,80	140,30	139,90	160,40	0,511	0,510	0,575	2,610	2,493	4,689	53,53	53,52	53,43	56,14	56,02	58,12
Soğutucu Akışkan	4	0,091	0,096	0,088	17,31	17,37	16,44	140,30	139,90	160,40	0,534	0,532	0,604	0,237	0,054	0,103	49,39	49,74	49,80	49,63	49,79	49,91
Soğutucu Akışkan	5	0,091	0,096	0,088	20,50	20,20	18,44	243,30	231,20	225,10	0,881	0,837	0,819	1,945	2,303	1,400	52,43	52,43	52,33	54,37	54,73	53,73
Hava	6	1,129	1,132	1,120	36,05	35,47	36,63	47,93	47,34	48,51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,15	1,10	1,20
Hava	7	1,129	1,132	1,120	49,13	49,25	47,80	61,18	61,30	59,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,51	2,53	2,35
Hava	8	1,129	1,132	1,120	46,62	46,75	45,11	58,64	58,77	57,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,21	2,23	2,04
Hava	9	1,129	1,132	1,120	45,76	45,66	44,13	57,76	57,66	56,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,11	2,10	1,93
Hava	10	1,129	1,132	1,120	35,90	35,30	36,45	47,77	47,17	48,33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,13	1,08	1,18
Soğutma suyu	11	0,084	0,122	0,112	56,14	55,58	57,63	235,10	232,70	241,30	0,782	0,775	0,801	-	-	-	-	-	-	14,33	13,91	15,15
Soğutma suyu	12	0,084	0,122	0,112	47,00	46,59	48,60	196,90	195,10	199,90	0,665	0,659	0,674	-	-	-	-	-	-	9,26	9,16	9,71

^a Rezene (*Foeniculum vulgare*) bitkisinin sonuçları^b Ebegümeci (*Malva sylvestris* L.) bitkisinin sonuçları^c Kekik (*Thymus vulgaris*) bitkisinin sonuçları

Çizelge 7.3. İleri ekserji analizi için önlenemez koşullar uygulandıktan sonra elde edilen termodinamik veriler.

Akışkan	Hal	m (kg/s)			T (°C)			P (kPa)			e (kJ/kg)		
		1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c
Soğutucu Akışkan	1	0,062	0,065	0,060	51,14	50,58	52,63	908,00	910,00	868,00	58,49	58,56	57,85
Soğutucu Akışkan	2	0,062	0,065	0,060	97,20	95,80	97,80	2302,00	2275,00	2196,00	85,93	84,77	85,28
Soğutucu Akışkan	2a	0,062	0,065	0,060	71 10	70,00	69,10	2302,00	2275,00	2196,00	79,93	79,41	78,76
Soğutucu Akışkan	3	0,062	0,065	0,060	51,60	51,00	49,50	2278,98	2252,25	2174,04	52,04	51,82	51,17
Soğutucu Akışkan	4	0,062	0,065	0,060	17,90	18,00	16,30	926,25	928,29	885,45	50,60	50,41	50,01
Soğutucu Akışkan	5	0,062	0,065	0,060	42,00	41,59	43,60	917,08	919,10	876,68	57,82	57,99	56,99
Hava	6	0,622	0,665	0,614	46,60	46,00	44,50	101,33	101,33	101,325	2,21	2,14	1,97
Hava	7	0,622	0,665	0,614	66,10	65,00	64,10	101,33	101,33	101,33	4,98	4,80	4,65
Hava	8	0,622	0,665	0,614	63,10	62,00	61,10	101,33	101,33	101,33	4,49	4,32	4,18
Hava	9	0,622	0,665	0,614	62,10	61,00	60,10	101,33	101,33	101,33	4,33	4,16	4,02
Hava	10	0,622	0,665	0,614	59,10	58,00	57,10	101,33	101,33	101,33	3,87	3,71	3,58
Hava	10a	0,622	0,665	0,614	46,45	45,83	44,32	101,33	101,33	101,33	2,19	2,12	1,95
Soğutma suyu	11	0,014	0,015	0,013	56,14	55,58	57,63	101,33	101,33	101,33	14,33	14,33	14,33
Soğutma suyu	12	0,014	0,015	0,013	47,00	46,59	48,60	101,33	101,33	101,33	9,26	9,26	9,26

^a Rezene (*Foeniculum vulgare*) bitkisinin sonuçları

^b Ebegümeci (*Matba sylvestris* L.) bitkisinin sonuçları

^c Kekik (*Thymus vulgaris*) bitkisinin sonuçları

Çizelge 7.4. GMIP kurutucu sisteminde geleneksel ekserji analizi kullanılarak elde edilen sonuçlar.

Bileşen	$\dot{E}_{F,k}$ (kW)			$\dot{E}_{D,k}$ (kW)			ε (%)			SI			IP (kW)			RI (%)			f (%)		
	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c
Kompresör	2,432	2,380	2,352	0,218	0,231	0,274	91,05	90,28	88,33	11,17	10,28	8,57	0,019	0,023	0,032	5,84	6,87	7,69	12,72	12,97	13,38
Kondenser	2,249	2,161	1,810	0,629	0,617	0,515	7202	71,45	71,53	3,57	3,50	3,51	0,176	0,176	0,147	16,87	18,33	14,45	11,76	11,78	10,30
Genleşme vanası	5,385	5,099	5,119	0,599	0,592	0,723	88,88	88,40	85,87	8,99	8,62	7,08	0,067	0,069	0,102	16,06	17,57	20,28	28,16	27,79	29,12
Evaporatör	0,656	0,501	0,542	0,181	0,070	0,205	72,38	85,99	62,18	3,62	7,14	2,64	0,050	0,010	0,077	4,86	2,09	5,74	3,43	2,73	3,08
ÇBID	0,581	0,429	0,609	0,423	0,256	0,490	27,24	40,31	19,53	1,37	1,68	1,24	0,308	0,153	0,394	11,34	7,61	13,74	3,04	2,34	3,46
Kurutma kabini	2,520	2,498	2,285	0,140	0,110	0,120	94,44	95,61	94,73	17,99	22,80	18,98	0,008	0,005	0,006	3,76	3,25	3,38	13,18	13,61	13,00
Kurutma kanalları	5,238	5,224	4,797	1,494	1,447	1,191	71,49	72,30	75,18	3,51	3,61	4,03	0,426	0,401	0,296	40,05	42,98	33,40	27,39	28,47	27,29
Fan	0,062	0,058	0,065	0,046	0,043	0,047	26,06	24,95	27,14	1,35	1,33	1,37	0,034	0,033	0,034	1,22	1,29	1,32	0,32	0,32	0,37
IP ünitesi	10,722	10,141	9,822	1627	1,510	1,718	84,83	85,11	82,51	6,59	6,72	5,72	0,247	0,225	0,300						
Tüm sistem	19,123	18,350	17,587	3,729	3,370	3,566	80,50	81,66	79,71	5,13	5,45	4,93	0,727	0,617	0,723						

^a Ebegümeci (*Malva sylvestris* L.) bitkisinin sonuçları

^b Rezene (*Foeniculum vulgare*) bitkisinin sonuçları

^c Kekik (*Thymus vulgaris*) bitkisinin sonuçları

Geleneksel ve ileri ekserji analiz metodları kullanılarak GMIP kurutucu sistemi ve sistem bileşenlerinin performansları değerlendirilmiş olup aynı zamanda tasarımlarının ve tüm sistemin çalışma şartlarının iyileştirilmesi için sistem bileşenleri kendi aralarında kıyas edilmişlerdir.

Çizelge 7.4’de GMIP kurutucu sisteminin geleneksel ekserji analizi ile elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Çizelge 7.4’de, ekserji yıkım değerinin 3,336-3,729 kW arasında değişmekte olduğu ve bu değer $\%18,17-20,28$ kadar ekserjetik yakıt iken $\%22,26-24,44$ kadarının ise ekserjetik ürün olduğu görülebilir. Geleneksel ekserji analiz sonuçlarına göre kurutma kanalları en yüksek ekserji yıkımına sahip olan bileşen olduğu için öncelikle ele alınması gereken sistem bileşenidir. Onu kondenser ve genişleme vanası izlemektedir. Bu sebeple tüm sistemin performansının geliştirilebilmesi için kurutma kanalları, kondenser ve genişleme vanasında meydana gelen tersinmezliklerin azaltılması yoluna gidilmesi önerilebilir. Evaporatör ve kurutma kabiniinde meydana gelen ekserji yıkımı ise diğer bileşenlere oranla daha düşüktür. Bu sebeple bu bileşenler tüm sistemin ekserji verimliliğini önemli ölçüde etkilemezler. Geleneksel ekserji analiz sonuçlarına göre kompresör ve ÇBID bileşenleri GMIP kurutma sistemindeki diğer önemli bileşenlerdir. IP ünitesi için ekserji verimliliği $\%82,51-85,11$ arasında iken GMIP sistemi için $\%79,71-81,66$ oranları arasında değişmektedir.

Ekserjetik faktör değeri her bir bileşenin sahip olduğu ekserji akım değeri hakkında bilgi edinilmesini ve birbirinden farklı bileşenlerin kıyas edilebilmesini sağlamaktadır. Çizelge 7.4’de görüldüğü üzere en yüksekten en düşüğe doğru ekserjetik faktör oranına sahip olan bileşenler sırası ile genişleme vanası ($\%27,79-29,12$) ardından kurutma kanalları ($\%27,29-28,47$) ve kompresördür ($\%12,72-13,38$). Evaporatör ve ÇBID düşük ekserjetik faktör değerine sahip olduğundan tüm sistemin verimliliğinde önemli bir etkiye sahip değildir. En yüksek *IP* değerine sahip olan kurutma kanalları diğer sistem bileşenlere kıyasla daha düşük ekserji verimliliğine sahiptir.

Kurutma kanallarından sonra ÇBID ve kondenser yüksek *IP* değerine sahip olan bileşenler olarak görülmektedir. Bunun yanı sıra kurutma kanalları en yüksek *RI* oranına ($\%33,40-42,98$) sahiptir.

Genleşme vanası (%16,06-20,28), kondenser (%14,45-18,33) ve ÇBID (%7,61-13,74) yüksek RI değerine sahip olan diğer bileşenler olarak belirtilirken geriye kalan diğer dört sistem bileşenin RI değeri % 8'den daha düşüktür. Diğer taraftan, kurutma kabini (%17,99-22,80) ve kompresörün (%8,57-11,17) şaşırtıcı derecede yüksek SI değerine sahip olduğu görülmektedir. ÇBID ve fan çok düşük SI değerine sahip olduklarından dolayı çevrenin etkisinden en fazla etkilenen bileşenler oldukları görülmektedir (Çizelge 7.4). Ayrıca, tüm sistemin ekserji verimliliği %79,71-81,66 aralığında hesaplanmıştır.

Böylece, geleneksel ekserji analizi ile sistem bileşenleri içerisinde yüksek termodinamik tersinmezliğe sahip olanlar belirlenebilir fakat bileşenler arasındaki etkileşimler ve gerekli doğru geliştirme potansiyelleri belirlenemez. Geleneksel ekserji analizi ile tüm sistem bileşenlerinin toplam tersinmezlikleri belirlenebilmekte fakat tersinmezliklerin kaynakları ve gerçek geliştirme potansiyelleri hesaplanamamaktadır.

Çizelge 7.5'de ekserjetik ürün $\dot{E}_{p,k}$, ekserji yıkım oranı $y_{D,k}$ ve ekserji verimliliği ε_k her bir bileşen ve tüm sistem için belirtilmiştir. Ayrıca ileri ekserji analizi sonucu hesaplanan önlenebilir ekserji yıkım oranı $y_{D,k}^{AV}$ ve modifiye ekserji verimliliği ε_k^* değerleri de aynı çizelgede verilmiştir. Ekserji yıkım oranı $y_{D,k}$, ekserji yıkımının tüm sisteme olan katkısını ifade eder tüm sistem bileşenlerini önem sırasına göre en yüksek orandan en düşük orana göre sıralarsak; kurutma kanalları, kondenser, genleşme vanası, ÇBID, kompresör, evaporatör, kurutma kabini ve fan olarak sıralanabilir.

Fakat ileri ekserji analizi sonucu elde edilen önlenebilir ekserji yıkım ($\dot{E}_{D,k}^{AV}$) değerlerine göre bu bileşenlerden bazılarında günümüz teknolojisi kullanılarak ekserji yıkım ($\dot{E}_{D,k}$) değerlerinde bir iyileştirme yapılabilir (Tsatsaronis ve Morosuk, 2010).

Örneğin, *Malva sylvestris* L. bitkisinin kurutma sonucuna bakıldığında kompresörde meydana gelen ekserji yıkım değerinin sadece %12'lik kısmı önlenebilir ekserji yıkımıdır. Bir sistemi değerlendirirken önlenebilir ekserji yıkımlarına yoğunlaşılır çünkü bu kısım sistemin geliştirilebilme potansiyelini ortaya koymaktadır. Ekserji yıkımlarının önlenebilir ve önlenebilir parçalarına ayrılma sonuçlarına bakıldığında (Şekil 7.1-7.4) en yüksek önlenebilir ekserji yıkım oranlarının sırası ile kondenser (%96,8–98,7), genleşme vanası (%77,6–85,9), kurutma kanalları (%64,0–70,8) ve DPHE (%52,7–92,2) de meydana geldiği görülmektedir. Bu verilere göre bu bileşenlerde meydana gelen ekserji yıkım değerleri ele alınan bileşenin kendisinin iyileştirilmesi veya geri kalan sistem bileşenlerinin geliştirilmesi ile azaltılabilir.

Isı değiştiricilerinde meydana gelen tersinmezlikler iki ısı değiştirici arasında dolaşan akışkanın sıcaklık farkından basınç kaybından, akış dengesizliğinden ve çevreye olan ısı transferinden kaynaklanabilmektedir.

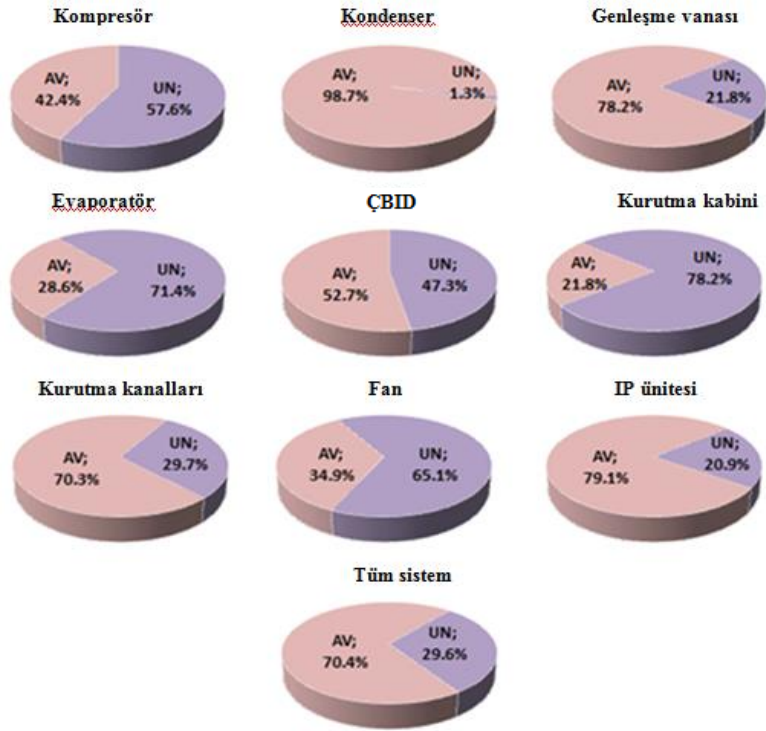
Çizelge 7.5. Modifiye ekserji verimliliği ve ekserji yıkım oranı parametreleri ile geleneksel ekserji analizi sonuçları.

Bileşen	$\dot{E}_{P,k}$ (kW)			y_{Dk} (%)			y_{Dk}^{AV} (%)			$\dot{E}_{D,k}$ (kW)			ε_k (%)			ε_k^* (%)		
	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c
Kompresör	2,148	2,214	2,077	1,26	1,14	1,56	0,54	0,14	0,83	0,231	0,218	0,274	90,28	91,05	88,33	95,61	98,82	93,40
Kondenser	1,544	1,619	1,295	3,36	3,29	2,93	3,32	3,18	2,88	0,617	0,629	0,515	71,45	72,02	71,53	71,71	72,65	71,80
Genleşme vanası	4,508	4,786	4,396	3,22	3,13	4,11	2,52	2,43	3,53	0,592	0,599	0,723	88,40	88,88	85,87	90,68	91,15	87,60
Evaporatör	0,431	0,475	0,337	0,38	0,95	1,16	0,11	0,12	0,60	0,070	0,181	0,205	85,99	72,38	62,18	95,47	95,32	76,00
ÇBİD	0,173	0,158	0,119	1,39	2,21	2,79	0,74	1,40	2,57	0,256	0,423	0,490	40,31	27,24	19,53	56,14	37,07	20,80
Kurutma kabini	2,389	2,380	2,165	0,59	0,73	0,68	0,13	0,27	0,22	0,110	0,140	0,120	95,61	94,44	94,73	99,00	97,84	98,30
Kurutma kanalları	3,777	3,745	3,606	7,88	7,81	6,77	5,54	5,53	4,33	1,447	1,494	1,191	72,30	71,49	75,18	78,79	77,98	82,60
Fan	0,014	0,016	0,018	0,24	0,24	0,27	0,08	0,09	0,07	0,043	0,046	0,047	24,95	26,06	27,14	48,53	49,19	56,50
IP ünitesi	8,631	9,095	8,105	8,23	8,50	9,77	6,51	5,72	7,68	1,510	1,627	1,718	85,11	84,83	82,51	87,83	89,26	85,70
Tüm sistem	14,984	15,390	14,010	18,34	19,50	20,28	12,92	13,18	14,57	3,366	3,729	3,566	81,66	80,50	79,71	86,00	85,92	84,50

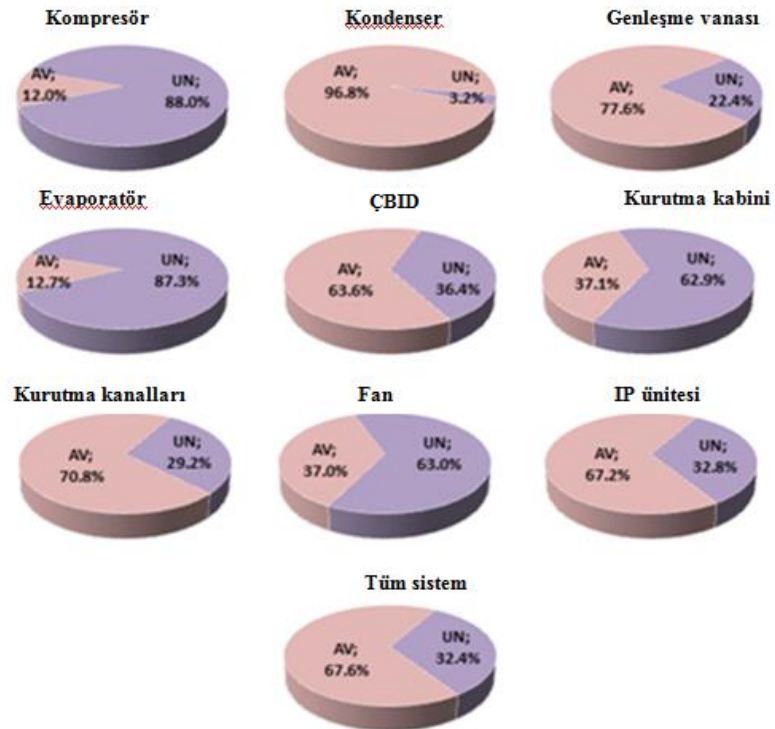
^a Rezene (*Foeniculum vulgare*) bitkisinin sonuçları^b Ebegümeçi (*Malva sylvestris* L.) bitkisinin sonuçları^c Kekik (*Thymus vulgaris*) bitkisinin sonuçları

Tüm sistemin önlenebilir ekserji yıkım oranı %67,6 ile %71,9 arasında değişirken kondenser, genişleme vanası ve kurutma kanalllarının tüm sistemin önlenebilir ekserji yıkım değerine olan katkıları %44,6 ile %67,6 arasında değişmektedir. Bu veriler sözü geçen bileşenlerin tüm sistemin önlenebilir ekserji yıkım oranında en fazla paya sahip bileşenler olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sebeple, tüm sistemde iyileştirme yapılabilmesi için kondenser, genişleme vanası, kurutma kanalları ve ÇBID gibi bileşenlerde tersinmezliklerin azaltılmasına odaklanılmalıdır. Genişleme vanasında meydana gelen tersinmezlikler akışkanın basıncının genişleme vanasından geçerken basıncının ani düşmesinden ileri gelebilmektedir. Bu genişleme kaybını önlemedeki tek yol genişleme vanası yerine izantropik bir türbin yerleştirmek ve basınç düşümünden shaft işini geri kazanma olabilir.

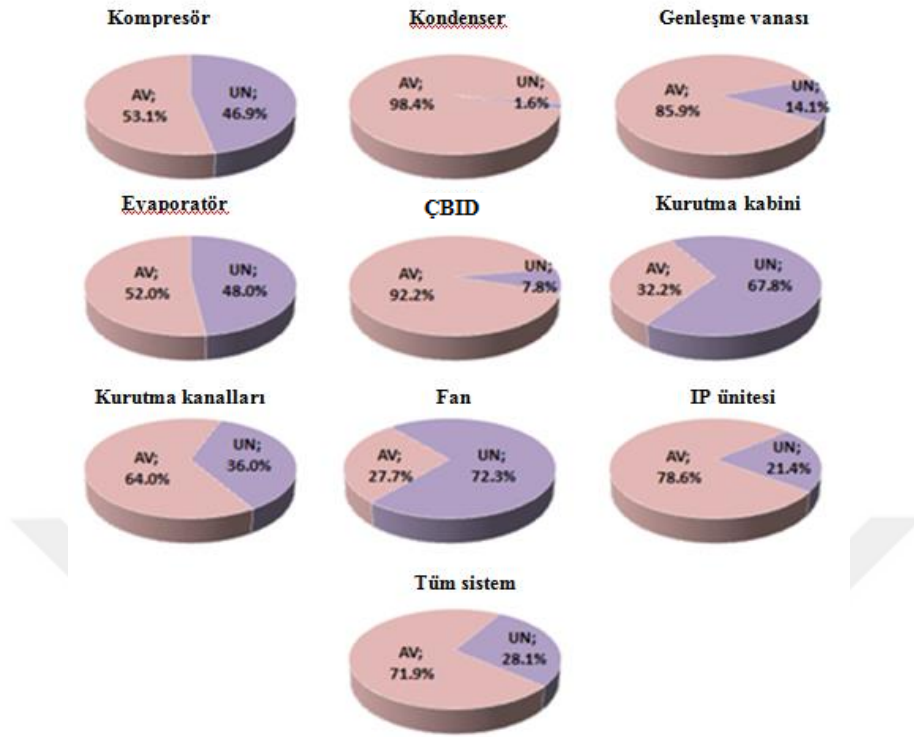
Diğer taraftan, sistem bileşenleri içerisinde en yüksek önlenemez ekserji yıkım oranına sahip olan eleman kurutma kabinidir (%62,9-78,2). Kurutma kabinini sırası ile fan (%63,0-72,3) ve evaporatör izlemektedir. Bu bileşenler yüksek önlenemez ekserji yıkım oranına sahip olan bileşenler olsalarda tüm sistemin önlenemez ekserji yıkım oranına olan katkıları %5 ile %7,4 arasında değişmektedir. Tüm sistemde meydana gelen önlenemez ekserji yıkım oranı $\dot{E}_{D,k}^{UN}$, ise %28,1-32,4 arasında değişmektedir, Kurutma kabininde meydana gelen tersinmezlikler kurutma prosesi sırasında gizli ısıнын meydana gelmesi ve kısmen kurutma havasının kabinden kaybı ile mümkün olabilmektedir. *Malva sylvestris L.*, bitkisinin kurutulması esnasında tüm sistemin önlenemez ekserji yıkım oranı %32,4 olarak hesaplanırken kompresör ve kurutma kanallarının önlenemez ekserji yıkım oranları sırası ile %5,1 ve %11,7 olarak elde edilmiştir. Kompresör ve kurutma kanallarının tüm sistem bileşenleri içerisinde en yüksek önlenemez ekserji yıkım oranına sahip olan bileşenler olduğu görülmektedir.



Şekil 7.1. GMIP sisteminin Rezene (*Foeniculum vulgare*) bitkisi için ileri ekserji analiz sonuçları.



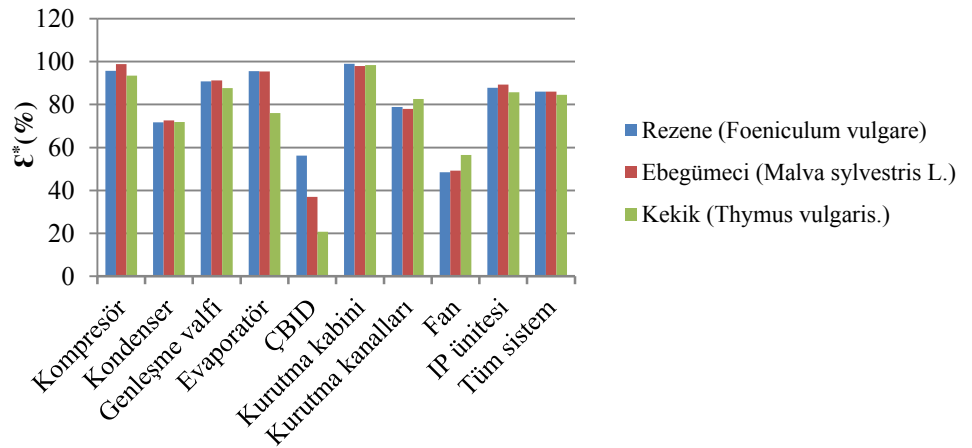
Şekil 7.2. GMIP sisteminin Ebegümeci (*Malva sylvestris L.*) bitkisi için ileri ekserji analiz sonuçları.



Şekil 7.3. GMIP sisteminin Kekik (*Thymus vulgaris*) bitkisi için ileri ekserji analiz sonuçları.

Geleneksel ekserji analizi ile sistem bileşenleri hakkında elde edilen eksik bilgiler ileri ekserji analizi yapılarak giderilmiş böylece daha güvenilir ve doğru iyileştirme olanakları öne sürülmüştür. Geleneksel ekserji analizi ile belirlenen ekserji yıkımları ileri ekserji analiz metodu ile çıkış noktalarına göre parçalarına ayrılmıştır. Sistemde yapılması planlanan iyileştirmelerde ekserji yıkımının sadece önlenabilir kısmı göz önünde bulundurulmalıdır.

Kompresör için modifiye ekserji verimliliği %93,40-%98,82 aralığında hesap edilmiştir (Şekil 7.4). Kompresörün iç kaynaklı ekserji yıkım akımı oldukça belirgin bir şekilde fazladır. Kompresörde meydana gelen toplam ekserji yıkımının %92,20'sinin iç kaynaklı olarak bulunması bu bileşende meydana gelen tersinmezliklerin diğer sistem bileşenlerinden bağımsız olarak düşürülebileceği anlamını taşır. Ayrıca kompresörde meydana gelen toplam ekserji yıkımının yaklaşık yarısı önlenebilirdir (Şekil 7.3). Bunlara ek olarak, ebegümeci bitkisi için toplam ekserji yıkım akım değerinin %40,69 kadarını AV-EN olarak hesap edilmiştir. Bu sonuç, kompresörde meydana gelen tersinmezliklerin günümüz teknolojisi ile kompresörün çalışma şartlarına odaklanarak azaltılabileceği anlamını taşımaktadır.



Şekil 7.4. GMIP kurutucu sistem bileşenlerinin modifiye ekserji verimliliği dağılımı.

Evaporatörün modifiye ekserji verimliliği %76,0-95,47 aralığında (Şekil 7.4) iken rezene (*Foeniculum vulgare*) bitkisi için toplam ekserji yıkım akımının sadece %12,7'si önlenebilirdir. Ayrıca önlenebilir ekserji yıkım akımının büyük kısmı AV-EN olarak görülmektedir (Çizelge 7.6). Önlenebilir ekserji yıkım akımı düşük olduğu için evaporatörde yapılacak iyileştirmeler için uygulanabilecek aksiyonlar fazla önem arz etmese de, iyileştirmeler bileşenin kendisinin geliştirilmesi üzerine odaklı olmalıdır.

GMIP kurutucu sisteminde en yüksek önlenebilir ekserji yıkım akım oranına sahip olan bileşen kondenserdir. %96,8-%98,7 oranında önlenebilir ekserji akımına sahip olan kondenser (Şekil 7.1-7.3) de önlenebilir kısmın çok büyük bir kısmı (%82,26-%94,28) dış kaynaklı olarak hesap edilirken iç kaynaklı önlenebilir kısmı (*AV-EN*) ise oldukça düşüktür (Çizelge 7.6). Bu sebeple kondenserde meydana gelen tersinmezlikler geri kalan sistem bileşenlerinin geliştirilmesi veya kurutma sıcaklığının değiştirilmesi gibi tüm sistemde ve proseste yapılacak olan iyileştirmeler mümkün olabilir.

İleri ekserji analiz sonuçları %96,89 oranında *UN-EN* ekserji yıkımına sahip olan genleşme vanasında meydana gelen yıkımların bileşenin kendi yapısal özelliklerinden kaynaklandığını göstermektedir. Bu sebeple yapılabilecek iyileştirmeler oldukça kısıtlıdır. ÇBID ise önlenebilir ekserji akım oranı oldukça düşüktür (Şekil 7.1-7.3). Diğer taraftan *AV-EN* oranının oldukça yüksek olması (%80,97- 97,77) ÇBID bileşeninin az bir geliştirme potansiyeli olmasına karşın yapılabilecek iyileştirmelerin bileşenin kendisi ile ilgili olduğunu göstermektedir.

Tüm bunlara ek olarak ÇBID de meydana gelen toplam ekserji yıkım akımının %81,02-91,0'i iç kaynaklı ekserji yıkımıdır.

Çizelge 7.6. GMIP kurutucu sisteminin detaylı ileri ekserji analiz sonuçları.

Bileşen, k	Tıbbi ve aromatik bitkiler	$\dot{E}_{D,k}^{EN}$ (kW)	$\dot{E}_{D,k}^{EX}$ (kW)	$\dot{E}_{D,k}^{UN}$ (kW)	$\dot{E}_{D,k}^{AV}$ (kW)			
					$\dot{E}_{D,k}^{UN,EN}$ (kW)	$\dot{E}_{D,k}^{UN,EX}$ (kW)	$\dot{E}_{D,k}^{AV,EN}$ (kW)	$\dot{E}_{D,k}^{AV,EX}$ (kW)
Kompresör	Ebegümeci	0,213	0,018	0,133	0,098	0,120	0,013	0,094
	Rezene	0,181	0,036	0,191	0,026	0,172	0,019	0,008
	Kekik	0,155	0,118	0,129	0,146	0,120	0,009	0,110
Kondenser	Ebegümeci	0,115	0,502	0,008	0,609	0,007	0,001	0,108
	Rezene	0,102	0,528	0,020	0,610	0,018	0,002	0,085
	Kekik	0,035	0,480	0,008	0,507	0,006	0,002	0,478
Genleşme vanası	Ebegümeci	0,588	0,004	0,129	0,463	0,125	0,004	0,463
	Rezene	0,557	0,041	0,134	0,464	0,111	0,023	0,018
	Kekik	0,704	0,019	0,102	0,621	0,098	0,004	0,605
Evaporatör	Ebegümeci	0,134	0,049	0,050	0,133	0,025	0,025	0,110
	Rezene	0,131	0,050	0,158	0,023	0,112	0,046	0,019
	Kekik	0,150	0,054	0,098	0,106	0,066	0,032	0,084
ÇBİD	Ebegümeci	0,230	0,026	0,121	0,135	0,098	0,022	0,132
	Rezene	0,384	0,038	0,154	0,268	0,122	0,032	0,262
	Kekik	0,397	0,093	0,038	0,452	0,030	0,008	0,366
Kurutma kabini	Ebegümeci	0,053	0,057	0,080	0,030	0,052	0,028	0,001
	Rezene	0,074	0,066	0,088	0,052	0,060	0,028	0,014
	Kekik	0,059	0,062	0,082	0,039	0,054	0,028	0,006
Kurutma kanalları	Ebegümeci	0,936	0,511	0,430	1,017	0,402	0,028	0,534
	Rezene	0,992	0,501	0,436	1,057	0,405	0,031	0,587
	Kekik	0,780	0,410	0,429	0,762	0,406	0,023	0,375
Fan	Ebegümeci	0,025	0,018	0,028	0,015	0,025	0,003	0
	Rezene	0,028	0,018	0,029	0,017	0,026	0,003	0,003
	Kekik	0,037	0,010	0,034	0,013	0,032	0,002	0,005

Geleneksel ekserji analizine göre en yüksek ekserji yıkımı akımı kurutma kanallarında meydana gelmektedir. Bu yıkım değerinin %70,8'i önlenabilir iken %64,68'i iç kaynaklı ekserji yıkımı olarak hesaplanmıştır (Çizelge 7.6). Ayrıca rezene (*Foeniculum vulgare*) bitkisi için kurutma kanallarında meydana gelen toplam yıkımın %39,31'i AV-EN ve %31,48'i AV-EX ekserji yıkım akımıdır. Burada meydana gelen tersinmezliklerin birçoğunun kanallardaki sızdırmazlığın artırılması ve bir kısmında diğer bileşenlerin negatif etkileşimlerinin azaltılması ile mümkün olabilir.

Kurutma kabini tüm sistem bileşenleri içerisinde en yüksek modifiye ekserji verimliliğine (%97,84-99,0) sahip olan bileşendir (Şekil 7.4). Önlenemez ekserji yıkım akımı (%62,9-78,2) yüksek iken iç kaynaklı ve dış kaynaklı ekserji yıkımları arasında belirgin bir fark yoktur. Ayrıca %73,07- %96,66 oranında AV-EX ekserji yıkım akım oranına sahip olduğu görülmektedir. Böylece kurutma kabininde meydana gelen tersinmezliklerin bileşenin kendisinden kaynaklanmadığı söylenebilir. Kurutma kabininde meydana gelen tersinmezlikler kurutma prosesinin optimizasyonu veya diğer sistem bileşenlerinin iyileştirilmesi ile azaltılabilir. Fakat bunun tüm sistemin verimliliği üstünde çok az bir etkisi olmaktadır.

Tüm sistemin modifiye ekserji verimliliği %84,50-%86,0 aralığında hesaplanmıştır. Ayrıca tüm sistemde meydana gelen toplam ekserji yıkım akımının %67,6-%71,9'u önlenelirdir ve sistemin optimizasyonu ile geri kazanılabilir.

GEHP kurutucu sistemi için geleneksel eksergoekonomik ve ileri eksergoekonomik analiz sonuçları Çizelge 7.7 ile Çizelge 7.8-7.13 de gösterilmiş olup önlenabilir/önlenemez yatırım maliyet hesaplamaları için yapılan kabuller Çizelge 6.4 de bulunmaktadır. Geleneksel ekserji analizine göre tüm sistemin ekserji verimliliği %79,7-81,7 aralığında hesaplanmıştır.

Eksergoekonomik faktör değeri, yatırım maliyet değerleri ile tersinmezliklerin sebep olduğu maliyet değerleri arasındaki ilişki hakkında bilgi sağlamaktadır.

Yüksek eksergoekonomik faktör tüm sistemin maliyetini azaltmak için yatırım maliyetlerinin azaltılması gerektiğini belirtir iken, düşük eksergoekonomik faktör ise sistem maliyetini düşürmek için daha verimli bileşenlerin kullanılmasının gerekli olduğuna işaret eder. Buna göre, kurutma kabini (%62,6-66,9) maksimum eksergoekonomik faktöre sahip iken kurutma kanalları (%3,3-3,9) minimum eksergoekonomik faktöre sahip sistem bileşeni olarak hesaplanmıştır. Bağlı maliyet farkı, bir bileşen için ekserjetik ürün maliyetinin ekserjetik yakıt maliyetine oranla bağlı artışını tanımlamaktadır. Ve bu fark, bileşenin değerlendirilmesi ve optimize edilmesi açısından önemlidir. Geleneksel eksergoekonomik analize göre (Çizelge 7.7), en yüksek bağlı maliyet farkları sırası ile fan (3,77–4,73), ÇBİD (1,65–4,24) ve kurutma kanallarında (0,80–1,08) meydana gelmektedir. Ebegümeci (*Malva sylvestris L.*) bitkisinin kurutulması sonucunda kurutma kanalları (1632,39 \$/GJ) ve kondenserin (1075,23 \$/GJ), genleşme vanası (313,30 \$/GJ) ve evaporatör ile karşılaştırıldığında (355,85 \$/GJ) daha yüksek birim yakıt ekserjisi maliyetine sahip olduğu görülmüştür.

Ayrıca, eksergoekonomik analizinin önemli sonuçlarından biri de ekserji yıkımının maliyet ile korelasyonudur. Ekserji yıkım maliyet değeri bileşen seviyesinde hesaplanır ve ona karşılık gelen yatırım maliyet değeri ile karşılaştırılır. Bileşenler kendilerine ait olan toplam maliyet değerini ($\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$) ifade eden ekserji yıkım akımı maliyeti ve yatırım maliyeti ile değerlendirilir.

Toplam maliyet değeri yüksek olan bileşenler tüm sistemin maliyeti üzerinde daha etkili olduğu için önem arz eden bileşenlerdir.

Çizelge 7.7 de görüldüğü üzere en yüksek toplam maliyet değerine sahip olan bileşenler sırası ile; kurutma kanalları, kondenser, kurutma kabini, kompresör, genleşme vanası, ÇBİD ve fan olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 7.7. GMIP kurutucu sisteminin geleneksel eksergoekonomik analizi sonuçları.

Bileşen	$E_{D,k}$ (kW)			ε (%)			C_F (\$/GJ)			f (%)			r			$C_{D,k} + Z_k$ (\$/h)		
	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c	1 ^a	2 ^b	3 ^c
Kompresör	0,231	0,218	0,274	90,28	91,05	88,33	713,56	672,80	106119	22,32	24,46	14,00	0,14	0,13	0,15	0,76	0,70	1,22
Kondenser	0,617	0,629	0,515	71,45	72,02	71,53	1075,23	990,79	1397,94	5,89	6,24	6,76	0,42	0,41	0,31	2,54	2,40	2,21
Genleşme vanası	0,592	0,599	0,723	88,40	88,88	85,87	313,30	303,48	669,56	4,87	4,96	1,92	0,14	0,13	0,17	0,70	0,68	1,77
Evaporatör	0,070	0,181	0,205	85,99	72,38	62,18	355,85	343,48	782,11	58,69	36,41	18,17	0,40	0,60	0,74	0,36	0,35	0,70
ÇBİD	0,256	0,423	0,490	40,31	27,24	19,53	370,72	342,88	779,28	10,12	6,86	2,72	1,65	2,87	4,24	0,38	0,56	1,41
Fan	0,043	0,046	0,047	24,95	26,06	27,14	734,83	668,65	791,82	34,15	35,08	30,87	4,73	4,43	3,77	0,17	0,17	0,19
Kurutma kanalları	1,447	1,494	1,191	72,30	71,50	75,18	1632,39	1499,40	1784,33	3,55	3,87	3,33	1,01	1,08	0,80	4,58	4,38	4,09
Kurutma kabini	0,110	0,140	0,120	95,61	94,44	94,73	809,56	735,29	886,73	66,86	63,37	62,59	0,14	0,16	0,15	0,96	1,01	1,02

^a Ebegümeçi (*Malva sylvestris* L.) bitkisinin sonuçları

^b Rezene (*Foeniculum vulgare*) bitkisinin sonuçları

^c Kekik (*Thymus vulgaris*) bitkisinin sonuçları

Örneğin, kurutma kanallarında yatırım maliyet değerinin toplam maliyet değerine olan düşük katkısından ve yüksek bağıl maliyet farkına (r_k), sahip olmasından dolayı bu bileşenin geliştirilebilmesi sahip olduğu ekserji yıkımının azaltılması ile yapılabilir. Ayrıca, kurutma kanallarının eksergoekonomik faktör (f_k) değeri düşük olarak belirtilmiştir. Bu sebeple, düşük eksergoekonomik faktöre sahip olan bileşenler için yatırım maliyetlerinde artmaya sebep olsada ekserji yıkımında azaltma yoluna gidilmesi önerilmektedir.

Çizelge 7.8-7.10 da üç farklı tıbbi ve aromatik bitkinin deneysel kurutulması sonucu elde edilen parçalara ayrılmış yatırım maliyet değerleri görülmektedir. Tüm sistem bileşenleri için iç kaynaklı yatırım maliyet değeri $\dot{Z}_k^{EN}$, dış kaynaklı yatırım maliyet değerinden $\dot{Z}_k^{EX}$, daha fazla bulunmuştur. Bu da bize genel olarak, bileşenler arasındaki etkileşimin yatırım maliyeti üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Özellikle, %80 ve %93-95 oranında iç kaynaklı yatırım maliyet oranlarına sahip olan kompresör ve kondenser bileşenleri genel olarak kendi çalışma şartlarından meydana gelen termodinamik verimsizliklerinden etkilenirken geri kalan sistem bileşenlerinin çalışma koşulları veya yapısal özelliklerinden daha az oranda etkilenmektedirler. Örneğin kompresörün iç kaynaklı yatırım maliyet değeri dış kaynaklı yatırım maliyet değerinden dört kat daha fazladır. Diğer taraftan, evaporatör de ise iç ve dış kaynaklı yatırım maliyet değerleri arasında fazla bir fark bulunmamaktadır.

İç ve dış kaynaklı yatırım maliyetleri arasındaki fark önlenabilir ve önlenemez kısımlarını da göz önünde bulundurduğumuz anda önemli ölçüde düşer. Bu çerçevede kondenser için ilginç sonuçlar elde edilmiştir. Önlenabilir iç kaynaklı maliyet değeri belirgin bir şekilde düşerek genleşme vanasının değerine ulaşır iken dış kaynaklı maliyet değeri ise diğer sistem bileşenlerini aşmıştır.

Sistem için yatırım maliyet değerleri geliştirme potansiyeli düşük bulunmuştur. Çünkü tüm sistem bileşenleri için önlenemez yatırım maliyet değerleri önlenabilir kısımdan daha yüksektir.

GMIP sistemi için yüksek önlenebilir iç kaynaklı maliyet değeri bize eğer bu maliyeti sistem içerisinde bir bileşen için düşürmek istiyorsak, değişimin o bileşenin kendisi ile ilgili yapılması gerektiğini belirtir. Bu bileşenin yapıldığı malzemin değiştirilmesi veya çalışma şartları izin veriyorsa üretim yöntemlerinin daha az maliyetli olanlarının kullanılması şeklinde gerçekleştirilebilir. Bu sistem için yatırım maliyetleri değerlendirildiğinde, sistemin potansiyel olarak geliştirilebilmesi kurutma kabini, kompresör ve kondenser bileşenlerinin geliştirilmesi ile mümkün olabilir. Bu durumda, en yüksek önlenebilir iç kaynaklı yatırım maliyet değerine sahip olan sistem bileşeni kurutma kabinidir (0,044 \$/h).



Çizelge 7.8. GMIP kurutucu sisteminde Ebegümeçi (*Malva sylvestris L.*) bitkisi için yatırım maliyetlerinin bölümlere ayrılması (\$/h).

	$Z_k^{gerçek}$	Z_k^{UN}	Z_k^{AV}	Z_k^{EN}	Z_k^{EX}	$Z_k^{UN,EN}$			Z_k^{UN}
						$Z_k^{AV,EN}$	$Z_k^{AV,EX}$	$Z_k^{UN,EX}$	
Kompresör	0,171	0,145	0,026	0,138	0,033	0,021	0,005	0,117	0,028
Kondenser	0,150	0,135	0,015	0,143	0,007	0,014	0,001	0,129	0,006
Genleşme vanası	0,035	0,030	0,005	0,028	0,007	0,003	0,002	0,025	0,005
Evaporatör	0,128	0,115	0,013	0,088	0,040	0,009	0,004	0,080	0,035
ÇBİD	0,038	0,034	0,004	0,028	0,010	0,003	0,001	0,025	0,009
Fan	0,060	0,036	0,024	0,043	0,017	0,017	0,007	0,026	0,010
Kurutma Kanalları	0,043	0,038	0,005	0,029	0,014	0,003	0,002	0,026	0,012
Kurutma Kabini	0,641	0,577	0,064	0,415	0,226	0,041	0,023	0,374	0,203

Çizelge 7.9. GMIP kurutucu sisteminde Rezene (*Foeniculum vulgare*) bitkisi için yatırım maliyetlerinin bölümlere ayrılması (\$/h).

	$Z_k^{gerçek}$	Z_k^{UN}	Z_k^{AV}	Z_k^{EN}	Z_k^{EX}	Z_k^{AV}			Z_k^{UN}
						$Z_k^{AV,EN}$	$Z_k^{AV,EX}$	$Z_k^{UN,EN}$	$Z_k^{UN,EX}$
Kompresör	0,171	0,145	0,026	0,136	0,035	0,020	0,006	0,115	0,030
Kondenser	0,150	0,135	0,015	0,143	0,007	0,014	0,001	0,129	0,006
Genleşme vanası	0,035	0,031	0,004	0,024	0,011	0,003	0,001	0,021	0,010
Evaporatör	0,128	0,115	0,013	0,094	0,034	0,009	0,004	0,084	0,031
ÇBİD	0,039	0,035	0,004	0,032	0,007	0,003	0,001	0,029	0,006
Fan	0,060	0,036	0,024	0,045	0,015	0,018	0,006	0,027	0,009
Kurutma Kanalları	0,043	0,038	0,005	0,031	0,012	0,003	0,002	0,028	0,010
Kurutma Kabini	0,641	0,577	0,064	0,435	0,206	0,044	0,020	0,391	0,186

Çizelge 7.10. GMIP kurutucu sisteminde Kekik (*Thymus vulgaris*) bitkisi için yatırım maliyetlerinin bölümlere ayrılması (\$/h),

$Z_k^{gerçek}$	Z_k^{UN}	Z_k^{AV}	Z_k^{EN}	Z_k^{EX}	Z_k^{UN}				
					$Z_k^{AV,EN}$	$Z_k^{AV,EX}$	$Z_k^{UN,EN}$	$Z_k^{UN,EX}$	
Kompresör	0,171	0,145	0,026	0,143	0,028	0,021	0,005	0,121	0,024
Kondenser	0,150	0,135	0,015	0,140	0,010	0,014	0,001	0,126	0,009
Genleşme vanası	0,035	0,031	0,004	0,023	0,012	0,002	0,002	0,020	0,011
Evaporatör	0,128	0,115	0,013	0,108	0,020	0,011	0,002	0,097	0,018
ÇBİD	0,039	0,035	0,004	0,028	0,011	0,003	0,001	0,026	0,009
Fan	0,060	0,036	0,024	0,037	0,023	0,015	0,009	0,022	0,014
Kurutma Kanalları	0,043	0,038	0,005	0,030	0,013	0,004	0,001	0,026	0,012
Kurutma Kabini	0,641	0,577	0,064	0,418	0,223	0,042	0,022	0,376	0,201

Çizelge 7.11-7.13’de verilen üç farklı tıbbi ve aromatik bitkinin deneysel kurutulması sonucu elde edilen parçalara ayrılmış ekserji yıkım akımı maliyet bakıldığında kondenser ve kurutma kabini dışında tüm sistem bileşenleri için iç kaynaklı ekserji yıkım maliyet değerinin dış kaynaklı kısımdan daha fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuç bize kondenser ve kurutma kabininin diğer sistem bileşenlerinden daha fazla etkilendiğini ve bu bileşenlerde meydana gelen ekserji yıkım akım maliyetlerini azaltmak için diğer sistem bileşenlerinde oluşan yıkımın azaltılması gerekli olduğunu göstermektedir. Ekserji yıkım akım maliyetlerini azaltmak için var olan bileşenlerin daha verimli ve yeni teknolojiye sahip olanlar ile değiştirilmesi önerilmektedir. Sistem içerisinde maksimum iç kaynaklı ekserji yıkım maliyetine (2,45-2,63 \$/h) sahip olan ve aynı zamanda en yüksek ekserji yıkımı akımının meydana geldiği sistem bileşeni kurutma kanallarıdır.

Ekserji yıkım akım maliyetlerinin geliştirme potansiyellerini belirlemek için önlenebilir kısmı üzerinde durulmalıdır. Kompresör ve kurutma kabini dışında tüm sistem bileşenleri için önlenebilir ekserji yıkım maliyet değeri önlenebilir kısımdan daha fazla bulunmuştur (Çizelge 7.11-7.13). Bu sonuç, önlenebilir ekserji yıkımı maliyetlerine göre sistemin yüksek seviyede geliştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Önlenebilir/önlenebilir ekserji yıkımı maliyet sonuçlarına bakıldığında en yüksek önlenebilir ekserji yıkım maliyet değeri sırası ile kurutma kanalları (2,73–3,34 \$/h), kondenser (2,17–2,55 \$/h) ve genişleme vanasında meydana gelmiştir (0,51–1,50 \$/h). Bu veriler bize sözü edilen bileşenlerin tüm sistem içerisinde en fazla önlenebilir ekserji yıkımı maliyet değerini oluşturduğunu göstermektedir. Kompresör, kurutma kabini ve fan da ise önlenebilir ekserji yıkımı maliyet değeri önlenebilir kısımdan daha büyük bulunmuştur ve bu sebeple bu bileşenlerin geliştirilebilir potansiyelleri düşüktür. Kurutma kanalları maksimum geliştirme potansiyeline (2,73-3,34 \$/h), sahiptir ve böylece kurutma verimliliği de geliştirilmiş olmaktadır. Önlenebilir ekserji yıkımı maliyetinin büyük bir kısmı iç kaynaklı (2,47 - 2,63 \$/h), ve geri kalan kısmı da dış kaynaklıdır (1,58-1,91 \$/h).

Sadece geleneksel eksergoekonomik analiz sonuçlarını göz önünde bulundurulursa kondenser ve kurutma kanallarının yüksek ekserji yıkım maliyet değerine sahip olduğunu söylenebilir. Fakat bu bileşenler ileri eksergoekonomik analizi kullanılarak değerlendirildiğinde kondenserdeki yıkım maliyetinin %82 ve kurutma kanallarında meydana gelen yıkım maliyetinin %53 oranında önlenebilir dış kaynaklı olduğu görülmektedir. Bu da sözü edilen bileşenlerin yüksek dış kaynaklı maliyet değerine sahip olmalarından dolayı sistemde geri kalan bileşenlerden etkilendiği anlamını taşımaktadır. *Malva sylvestris* L. bitkisini kurutma sonuçlarında görüldüğü üzere kompresör ve evaporatör için geleneksel eksergoekonomik analiz sonuçları yanıltıcı olabilmektedir. Bu bileşenler yüksek ekserji yıkım maliyet değerine sahip olmalarına karşın geliştirilebilme potansiyelleri düşüktür ve geri kalan sistem bileşenlerinin ekserji yıkım maliyet değerleri ile ilişkilidir. Kurutma kanallarının ve kompresörün ileri eksergoekonomik analiz sonuçlarına göre diğer bileşenler yerine bu bileşenler üzerinde yoğunlaşılması gerekmektedir. Sistemin önlenebilir ekserji yıkım maliyet değerine bakıldığında, iç kaynaklı ve dış kaynaklı önlenebilir kısımlarının miktarlarının birbirlerine yakın olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.11. GMIP kurutucu sisteminde Ebegümeci (*Malva sylvestris L.*) bitkisi için ekserji yok oluş akımı maliyetlerinin bölümlere ayrılması (\$/h).

	$C_{D,k}^{gerçek}$	$C_{D,k}^{AV}$	$C_{D,k}^{UN}$	$C_{D,k}^{EN}$	$C_{D,k}^{EX}$	$C_{D,k}^{AV}$			$C_{D,k}^{UN}$
						$C_{D,k}^{AV,EN}$	$C_{D,k}^{AV,EX}$	$C_{D,k}^{UN,EN}$	$C_{D,k}^{UN,EX}$
Kompresör	0,595	0,253	0,342	0,550	0,045	0,241	0,012	0,308	0,034
Kondenser	2,388	2,357	0,031	0,445	1,943	0,418	1,939	0,027	0,004
Genleşme vanası	0,666	0,521	0,145	0,663	0,003	0,521	0	0,140	0,005
Evaporatör	0,235	0,171	0,064	0,172	0,063	0,141	0,030	0,031	0,033
QBID	0,342	0,180	0,162	0,307	0,035	0,176	0,004	0,131	0,031
Fan	0,116	0,042	0,074	0,066	0,050	0	0,042	0,067	0,007
Kurutma Kanalları	4,545	3,342	1,203	2,635	1,910	1,502	1,840	1,134	0,069
Kurutma Kabini	0,318	0,085	0,233	0,154	0,164	0,003	0,082	0,151	0,082

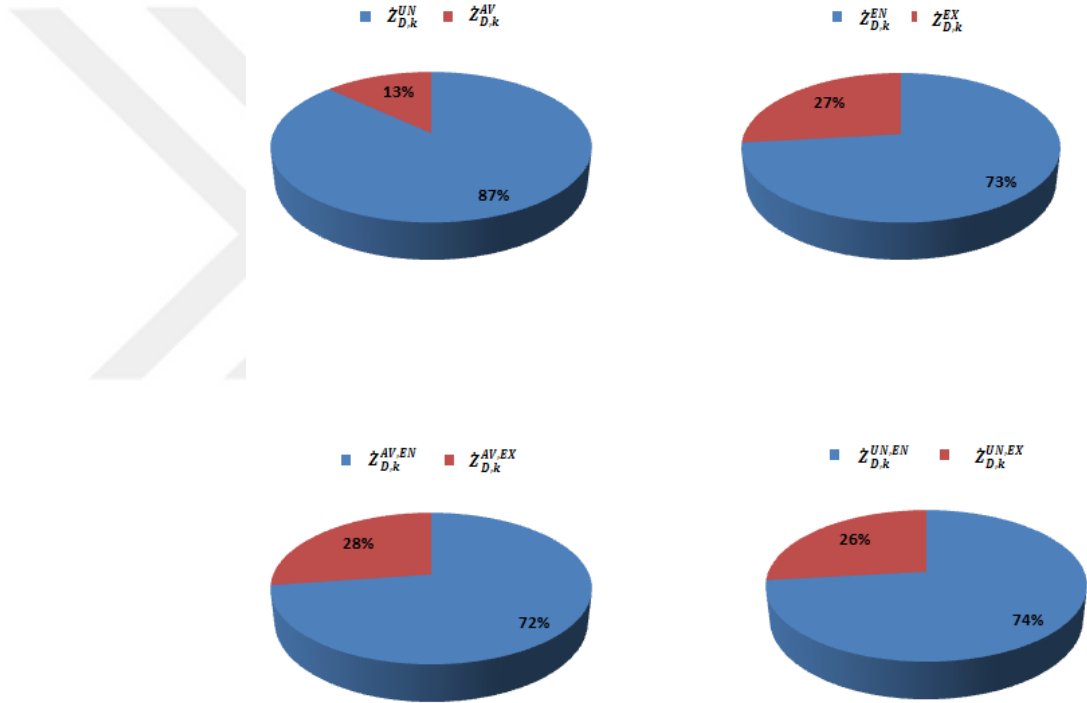
Çizelge 7.12. GMIP kurutucu sisteminde Rezene (*Foeniculum vulgare*) bitkisi için ekserji yok oluş akımı maliyetlerinin bölümlere ayrılması (\$/h).

	$C_{D,k}^{gerçek}$	$C_{D,k}^{AV}$	$C_{D,k}^{UN}$	$C_{D,k}^{EN}$	$C_{D,k}^{EX}$	$C_{D,k}^{AV}$	$C_{D,k}^{UN}$		
							$C_{D,k}^{AV,EN}$	$C_{D,k}^{AV,EX}$	$C_{D,k}^{UN,EX}$
Kompresör	0,528	0,066	0,462	0,438	0,090	0,022	0,044	0,416	0,046
Kondenser	2,247	2,175	0,072	0,360	1,887	0,297	1,878	0,062	0,010
Genleşme vanası	0,654	0,508	0,146	0,608	0,046	0,487	0,021	0,121	0,025
Evaporatör	0,224	0,029	0,195	0,162	0,062	0,023	0,006	0,138	0,057
ÇBİD	0,522	0,332	0,190	0,474	0,048	0,323	0,009	0,150	0,040
Fan	0,110	0,055	0,055	0,069	0,041	0,019	0,036	0,050	0,005
Kurutma Kanalları	4,341	3,228	1,113	2,551	1,790	1,502	1,726	1,050	0,063
Kurutma Kabini	0,371	0,138	0,233	0,196	0,175	0,038	0,100	0,158	0,075

Çizelge 7.13. GMIP kurutucu sisteminde Kekik (*Thymus vulgaris*) bitkisi için ekserji yok oluş akımı maliyetlerinin bölümlere ayrılması (\$/h).

	$C_{D,k}^{gerçek}$	$C_{D,k}^{AV}$	$C_{D,k}^{UN}$	$C_{D,k}^{EN}$	$C_{D,k}^{EX}$	$C_{D,k}^{AV}$	$C_{D,k}^{UN}$		
							$C_{D,k}^{AV,EN}$	$C_{D,k}^{AV,EX}$	$C_{D,k}^{UN,EX}$
Kompresör	1,050	0,557	0,492	0,596	0,454	0,138	0,419	0,458	0,034
Kondenser	2,063	2,023	0,040	0,176	1,887	0,146	1,877	0,030	0,010
Genleşme vanası	1,742	1,497	0,245	1,696	0,046	1,461	0,036	0,235	0,010
Evaporatör	0,577	0,301	0,276	0,422	0,155	0,236	0,065	0,186	0,090
ÇBİD	1,375	1,268	0,107	1,111	0,264	1,027	0,241	0,084	0,023
Fan	0,134	0,037	0,097	0,106	0,028	0,016	0,021	0,090	0,007
Kurutma Kanalları	4,050	2,730	1,320	2,466	1,584	1,216	1,514	1,249	0,071
Kurutma Kabini	0,383	0,121	0,262	0,185	0,198	0,015	0,106	0,170	0,092

Şekil 7.5’de gösterilen yatırım maliyet oranlarına bakıldığında iç kaynaklı kısmın belirgin bir şekilde yüksek olduğu (%73) ve geliştirme potansiyelinin düşük olduğu (%13) görülmektedir. Ayrıca, yatırım maliyetinin %72’si iç kaynaklı olarak belirtilmiştir ve bu da bileşen etkileşimlerinin güçlü olmadığını göstermektedir, Ayrıca Şekil 7.5’e göre sistemin iç kaynaklı önlenemez yatırım maliyet oranı %74 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.5. GMIP kurutucu sistemi için yatırım maliyetlerinin gösterimi.

8. SONUÇLAR

Bu doktora tezinde GMIP kurutma sistemi geleneksel ekserji/eksergoekonomik ve ileri ekserji/eksergoekonomik analizleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Ekserji analizi en yüksek termodinamik verimsizliğe (ekserji yıkımı) sahip olan komponentin ortaya çıkarılmasında kullanılmıştır. Fakat sistem için gerçekleştirebilecek potansiyel iyileştirmelerin belirlenebilmesi ileri ekserji temelli analiz yöntemleri ile mümkündür.

GMIP kurutucu sistemi içinn geleneksel ve ileri ekserji analizi sonuçları aşağıda verildiği gibi sıralanabilir;

- En yüksek ekserji yıkımı kurutma kanallarında meydana gelmiştir. Bu komponentte meydana gelen yıkımın yaklaşık %64,0-70,8'i önlenabilir ve %64,68-66,44'ü bileşenin kendi çalışma şartlarından (iç kaynaklı) kaynaklıdır.
- Daha sonra ise ikinci en yüksek ekserji yıkımına sahip olan kondenser üzerinde durulmalıdır. Kondenserde meydana gelen toplam yıkımın %96,8-98,7'si önlenbilirdir ve önlenbilir ekserji yıkımının %82,26-94,28'i dış kaynaklıdır. Bu sebeple kondenserde meydana gelen tersinmezlikler geri kalan sistem bileşenlerinin tersinmezliklerinin azaltılması ve tüm sistemde veya proseste yapılabilecek yapısal iyileştirilmeler ile mümkün olabilir.
- Sahip olduğu toplam ekserji yıkımının yaklaşık %90'ının önlenbilir ekserji yıkımı olmasından dolayı sistem içerisindeki en önemli bileşenin kondenser olduğu ileri ekserji analizi kullanılarak ortaya çıkarılmıştır.
- IP ünitesi için önlenbilir ekserji yıkım oranı %67,2-79,1 arasında değişir iken tüm sistem için önlenbilir ekserji yıkım oranı %67,6 ile %71,9 arasında değişmektedir.

- Geleneksel ekserji analiz sonuçlarına göre tüm sistemin ε_k değeri %79,71-81,66 arasında değişir iken ileri ekserji analiz sonuçları modifiye ekserji verimliliği (ε_k^*) değerinin % 84,50 ile % 86,00 arasında değiştiğini göstermektedir.
- Kondenser (%96,8-98,7) en yüksek önlenebilir ekserji yıkım değerine sahiptir ve ardından genleşme vanası (%77,6-85,9) gelmektedir.
- Kondenser dışında tüm sistem bileşenleri için iç kaynaklı ekserji yıkım akımı dış kaynaklı ekserji yıkım akımından yüksek değerde bulunmuştur. Bu sonuç, belirtilen bileşen dışında geri kalan sistem bileşenleri arasındaki etkileşimin fazla kuvvetli olmadığı anlamını taşımaktadır. Dolayısıyla sistem bileşenlerinin iç kaynaklı ekserji yıkımlarının azaltılması yoluna gidilmelidir.
- Kurutma kabininin önlenemez ekserji yıkım akımı % 62,9-78,2 aralığında hesaplanmıştır. Bu sebeple bu bileşenin iyileştirilmesi için yapılabilecekler oldukça sınırlıdır.

GMIP kurutucu sistemi için geleneksel ve ileri eksergoekonomik analiz sonuçları aşağıda verildiği gibi sıralanabilir;

- Toplam önlenebilir maliyet miktarı (önlenebilir yatırım maliyeti ve önlenebilir ekserji yıkım akımı maliyeti) göz önüne alındığında GMIP kurutucu sistemi için en önemli komponentler sırası ile; kurutma kanalları, kondenser, genleşme vanası ve kompresör olarak belirtilebilir. Bu bileşenlerin önlenebilir yatırım maliyet oranları nispeten düşük olsada önlenebilir ekserji yıkım akımı maliyet oranları yüksek olarak hesaplanmıştır.
- İleri eksergoekonomik analiz sonuçları toplam ekserji yıkım maliyetinin yaklaşık %90'ı önlenebilir olan kondenserin, en yüksek geliştirme potansiyeline sahip bileşen olduğunu ortaya koymuştur. Buna zıt bir şekilde, kurutma kabininin toplam ekserji yıkım akımı

maliyetinin %25'i önlenemez olarak bulunduğundan kurutma kabininin geliştirme potansiyeli düşüktür.

- GMIP kurutucu sistemi için yatırım maliyetlerine bakıldığında, bileşenler arasındaki etkileşim sonucu meydana gelen dış kaynaklı yatırım maliyeti düşük olduğundan fazla önem taşımadığı söylenebilir. Dolayısıyla iç kaynaklı yatırım maliyetleri tüm sistem bileşenleri için belirgin bir şekilde yüksektir.
- Tüm sistem için ekserji yıkım akımı maliyetini geliştirme potansiyeli (önlenebilir) %74 olarak belirlenirken bu oranın %55'i dış kaynaklıdır.

Son yıllarda artan çevresel etkilerin ve bu soruna karşı ilginin arttığı bilinmektedir. Bu sebeple sistemlerin çevreye etkisinin değerlendirmesini sağlayan ve yaşam döngüsü analizi ile ekserji analizini aynı paydada birleştiren geleneksel eksergoçevresel ve ileri eksergoçevresel analizlerinin de enerji dönüşüm sistemleri için kullanılması bundan sonraki çalışmalar için önerilmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Acikkalp, E., Aras, H. and Hepbasli, A., 2014a**, Advanced exergy analysis of a trigeneration system with a diesel–gasengine operating in a refrigerator plant building, *Energy and Buildings* 80: 268–275.
- Acikkalp, E., Aras, H. and Hepbasli, A., 2014b**, Advanced exergy analysis of a electricity generating facility using natural gas, *Energy Conversion and Management* 82: 146–153.
- Acikkalp, E., Aras, H. and Hepbasli, A., 2014c**, Advanced exergoeconomic analysis of an electricity-generating facility that operates with natural gas, *Energy Conversion and Management* 78: 452–460.
- Akpınar, E.K., 2005**, Deneysel çalışmalardaki hata analizine bir örnek: Kurutma deneylerindeki hata analizi, *Mühendis ve Makine*, 540: 41-48.
- Ballı O., 2008**, Kojenerasyon Sistemlerinin Enerji Kullanılabilirlik (Ekserji) ve Eksergoekonomik Analizi Yöntemleri Kullanılarak Performansının Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Eskisehir Osmangazi Üniversitesi, 182 s.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G. and Moran, M., 1996**, Thermal design and optimization, Wiley, New York., 542 p.
- Boyano, A., Gantiva, C., Morosuk T. and Tsatsaronis G., 2012**, Steam methane reforming system for hydrogen production: advanced exergetic analysis, *International Journal of Thermodynamics* 15: 1-9.
- Bussmann, W., 1978**, Heating of the Dortmund-Wellinghofen open air swimming pool with a gas heat pump (two years of operational experience), *Collection of Technical Papers – AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics & Materials Conference*, 26-31,34.
- Colpan, C.O., 2005**, Exergy analysis of combined cycle cogeneration systems, a thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of middle east technical university, Ankara, Turkey, 139 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Colpan C.O. and Yesin T., 2006,** Energetic exergetix and thermoeconomic analysis of Bilkent combined cycle cogeneration plant. Internaional Journal of Energy Research, 30, 875-894.
- Çengel, Y.A., ve Boles M.A., 2008,** Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik, Güven Bilimsel, 946 s.
- Dincer, I., 2002,** The role of exergy in energy policy making, *Energy Policy* 30: 137-149.
- Dincer, I. and Sahin, AZ., 2005,** A new model for thermodynamic analysis of a drying process, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47: 645-652.
- Erbay, Z. and Hepbasli, A., 2014,** Application of conventional and advanced exergy analyses to evaluate the performance of a ground-source heat pump (GSHP) dryer used in food drying, *Energy Conversion and Management* 78: 499–507.
- Eustace, V.A., 1984,** Testing and applications of a high temperature gas engine driven heat pump, *Journal of Heat Recovery Systems*, 4: 257-63.
- Flurschetz, E., 1978,** Use of heat pump in a municipal energy supply system, *Elektrowaerme Int Ed A.*, 36(3): 164-167.
- Güngör A., 2010,** Gaz motoru tahrikli ısı pompalı bantlı bir kurutma sisteminin performansının ekserjetik olarak değerlendirilmesi, Master Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, 112 s.
- Hammond, G.P. and Stapleton, A.J., 2001,** Exergy analysis of the United Kingdom energy system, *Proc Inst Mech Eng* 15:141–62.
- Hepbasli, A., 2008,** A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future, *Renew Sustain Energy Rev* 12:593–661.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hepbasli, A. and Akdemir, O., 2004**, Energy and exergy analysis of a ground source (geothermal) heat pump system, *Energy Conversion and Management*, 45: 737-753.
- Hepbasli, A., Erbay, Z., İçier, F., Çolak, N. ve Hancıoğlu, E., 2007**, Güneş enerjisi destekli gaz motoru tahrikli bir ısı pompası sistemi uygulaması, *İKLİM 2007, II. Ulusal İklimlendirme Kongresi, 15-18 Kasım, Antalya – Türkiye, Bildiriler Kitabı*, 351-366.
- Hepbasli, A., Erbay, Z., İçier, F., Colak, N. and Hancıoglu, E., 2009**, A review of gas engine driven heat pumps (GEHPs) for residential and industrial applications, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13(1): 85-99.
- Hepbasli, A. and Kecebas, A., 2013**, Comparative study on conventional and advanced exergetic analyses of geothermal district heating systems based on actual operational data, *Energy and Buildings* 61: 193–201.
- International Energy Agency (IEA), 2013**, Energy policies of IEA Countries Turkey 2013 Review, erişim: www.iea.org Erişim Tarihi: 20 Ağustos 2014.
- Kecebas, A. and Hepbasli, A., 2014**, Conventional and advanced exergoeconomic analyses of geothermal district heating systems, *Energy and Buildings* 69: 434–441.
- Kelly S., 2008**, Energy Systems Improvement based on Endogenous and Exogenous Exergy Destruction, Phd Thesis, Berlin Technical University, Berlin, 104 p.
- Kelly, S., Tsatsaronis, G. and Morosuk, T., 2009**, Advanced exergetic analysis: Approaches for splitting the exergy destruction into endogenous and exogenous parts, *Energy* 34: 384–391.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Khoshgoftar Manesh, M.H., Navid, P., Blanco Marigorta, A.M., Amidpour, M. and Hamed, M.H., 2013**, New procedure for optimal design and evaluation of cogeneration system based on advanced exergoeconomic and exergoenvironmental analyses, *Energy* 59: 314-333.
- Kotas, T.J., 1995**, The exergy method of thermal power plants. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company.
- Kwak H-Y., Kim D-J and Jeon J-S., 2003**, Exergetic and thermoeconomic analysis of power plants, *Energy* 28:343-360.
- Lazzaretto, A., and Tsatsaronis, G., 2006**, SPECO: A schematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems, *Energy* 31: 1257-1289.
- Lian, Z., Park, S., Huang, W., Baik, Y. and Yao, Y., 2005**, Conception of combination of gas-engine-driven heat pump and water-loop heat pump system, *International Journal of Refrigeration*, 28: 810-19.
- Midilli, A. and Kucuk, H., 2003**, Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio, *Energy*, 28: 539-556.
- Morosuk, T. and Tsatsaronis, G., 2008**, A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines, *Energy* 34: 890–907.
- Morosuk, T. and Tsatsaronis, G., 2009a**, Advanced Exergy Analysis for Chemically Reacting Systems –Application to a Simple Open Gas-Turbine System, *Int. J. of Thermodynamics* 12: 105–111.
- Morosuk, T. and Tsatsaronis, G., 2009b**, Advanced exergetic evaluation of refrigeration machines using different working fluids, *Energy* 34: 2248–2258.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Morosuk, T., Tsatsaronis, G., Boyano, A., and Gantiva, C., 2012**, Advanced exergy-based analyses applied to a system including lng regasification and electricity generation, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 3: 1-9.
- Mujumdar, A.S., 1997**, Drying Fundamentals, 7-30, *Industrial Drying of Foods*, Baker, C,G,J, (Eds.), Chapman & Hall, London.
- Ogura, M. and Kawasaki, T., 1987**, The first commercialized direct-expansion type gas engine heat pump, *Government Inst Inc Publishing*.
- Ozdemir, K., Hepbasli, A. and Eskin, N., 2010**, Exergoeconomic analysis of a fluidized-bed coal combustor (FBCC) steam power plant, *Applied Thermal Engineering* 30: 1621-1631.
- Petrakopoulou, F., 2011**, Comparative evaluation of power plants with Co2 capture: thermodynamic, economic and environmental performance, Phd Thesis, Berlin Technical University, Berlin, 209 p.
- Petrakopoulou, F., Tsatsaronis, G., Morosuk, T. and Carassai, A., 2012a**, Conventional and advanced exergetic analysis applied to a combined power plant, *Energy*, 41, 146-152.
- Petrakopoulou, F., Tsatsaronis, G. and Morosuk, T., 2013**, Evaluation of a power plant with chemical looping combustion using an advanced exergoeconomic analysis, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 3: 9–16.
- Rosen, M.A. and Dincer I., 2003**, Exergy-cost-energy-mass analysis of thermal systems and processes, *Energy Conversion and Management* 44: 1633-1651.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Soltani, S., Mahmoudi Yari, S.M.S., Morosuk, T. and Rosen, M.A., 2013,** Advanced exergy analysis applied to an externally-fired combined-cycle power plant integrated with a biomass gasification unit, *Energy* 59: 775-780.
- Tsatsaronis, G. and Morosuk, T., 2010,** Advanced exergetic analysis of a novel system for generating electricity and vaporizing liquefied natural gas, *Energy* 35: 820–829.
- Tan, M. and Kecebas, A., 2014,** Thermodynamic and economic evaluations of a geothermal district heating system using advanced exergy-based methods, *Energy Conversion & Management*, 77: 504-513.
- Vučković, G.D., Stojiljković, M.M., Vukić, M.V., Stefanović, G.M. and Dedić, E.M., 2014,** Advanced exergy analysis and exergoeconomic performance evaluation of thermal processes in an existing industrial plant. *Energy Conversion and Management* 85: 655–662.
- Zhang, R.R., Lu, X.S., Li, S.Z., Lin, W.S. and Gu, A.Z., 2005,** Analysis on the heating performance of a gas engine driven air to water heat pump based on a steady-state model, *Energy Conversion & Management*, 46: 1714-1730.

ÖZGEÇMİŞ

Ayşegül GÜNGÖR ÇELİK, 1985 yılında İzmir’de doğmuştur. İlk, öğrenimi Ankara İlkokulu’nda, orta ve lise öğrenimini ise Konak Anadolu Lisesi’nde tamamlamıştır. 2008 yılında Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden mezun olmuştur. Yüksek lisans öğrenimini 2010 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Termodinamik Bilim Dalı bölümünde tamamlamıştır. 2009 yılında Gediz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. 5 yıldır Gediz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. Uluslararası hakemli SCI’lı dergilerde 6 makalesi, uluslararası sempozyumlarda 4 ve ulusal sempozyumlarda 1 bildirisi bulunmaktadır.