

T.C.
MUĞLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ ANABİLİM DALI

İLERİ EKSERJİ ANALİZİ İLE JEOTERMAL GÜÇ
SİSTEMİNDE TERMODİNAMİK PERFORMANSIN
İYİLEŞTİRİLMESİNİN TESPİTİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HARUN GÖKGEDİK

KASIM 2013

MUĞLA

T.C.
MUĞLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ ANABİLİM DALI

İLERİ EKSERJİ ANALİZİ İLE JEOTERMAL GÜÇ
SİSTEMİNDE TERMODİNAMİK PERFORMANSIN
İYİLEŞTİRİLMESİNİN TESPİTİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HARUN GÖKGEDİK

KASIM 2013

MUĞLA

MUĞLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEZ ONAYI

HARUN GÖKGEDİK tarafından hazırlanan **İLERİ EKSERJİ ANALİZİ İLE JEOTERMAL GÜÇ SİSTEMİNDE TERMODİNAMİK PERFORMANSIN İYİLEŞTİRİLMESİNİN TESPİTİ** başlıklı tezin, 01/11/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Enerji Anabilim Dalı'nda yüksek lisans derecesi için gerekli şartları sağladığı oybirliği ile kabul edilmiştir.

TEZ SINAV JÜRİSİ

Doç. Dr. İlhan TARIMER (**Jüri Başkanı**)
Bilişim Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

İmza:



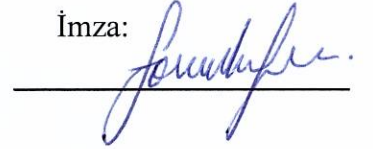
Doç. Dr. Ali KEÇEBAŞ (**Danışman**)
Enerji Anabilim Dalı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

İmza:



Doç. Dr. Faruk ŞEN (**Üye**)
Enerji Anabilim Dalı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

İmza:



ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI ONAYI

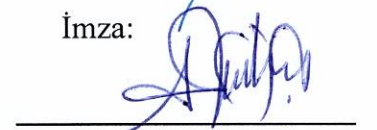
Doç. Dr. Naci Emre ALTUN
Enerji Anabilim Dalı Başkanı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

İmza:



Doç. Dr. Ali KEÇEBAŞ
Danışman, Enerji Anabilim Dalı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

İmza:

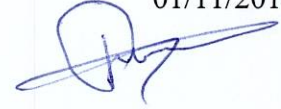


Savunma Tarihi: 01/11/2013

Tez çalışmalarım sırasında elde ettiğim ve sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgelerin tarafımdan bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde edildiğini; akademik ve bilimsel etik kurallarına uygun olduğunu beyan ederim. Ayrıca, akademik ve bilimsel etik kuralları gereği bu tez çalışması sırasında elde edilmemiş başkalarına ait tüm orijinal bilgi ve sonuçlara atıf yapıldığını da beyan ederim.

Harun Gökgedik

01/11/2013



ÖZET
İLERİ EKSERJİ ANALİZİ İLE JEOTERMAL GÜÇ SİSTEMİNDE
TERMODİNAMİK PERFORMANSIN İYİLEŞTİRİLMESİNİN TESPİTİ

Harun GÖKGEDİK

Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ali KEÇEBAŞ

Kasım 2013, 60 sayfa

Günümüzde fosil enerji kaynaklarının azalması ve olumsuz çevresel etkileri yüzünden yenilenebilir enerji kaynaklarına özellikle jeotermal enerjiye olan ilgi artmaktadır. Bu olumsuz etkileri azaltmak için jeotermal enerji kullanımında enerji sistem tasarımını geliştirmek için sistematik bazı yaklaşımlar geliştirmek önemli hale gelmiştir. Böylece verimli ve maliyeti düşük enerji dönüşüm sistemlerinin tasarımı, enerji mühendisleri için yüzleştikleri bir mücadele haline gelmiştir. Bu tez çalışmasında mevcut jeotermal bir ikili güç sisteminin (Bereket Jeotermal Güç Sistemi) geleneksel ve ileri ekserji analizleri yapılmıştır. Bu sayede sistem ve bileşenlerinde yok olan ekserji hakkında derinlemesine bilgiler toplanmış; sistemin termodinamik performansı değerlendirilerek geliştirilmesine odaklanılmıştır. İleri ekserji analizi yapılarak sistem bileşenleri arasındaki etkileşimler (içsel/dışsal kısımlar) ve yapılabilecek iyileştirmenin gerçek performansları (kaçınılmaz/önlenebilir kısımlar) araştırılmıştır. Çalışma sonucunda öncelikli iyileştirilecek bileşenler geleneksel ekserji analizinde KON 1, TURB 1 ve BUH 2 ve ileri ekserji analizinde KON 1, KON 2 ve ON-ISI 1 olarak sıralandığı görülmüştür. Böylece ileri ekserji analizinin sonuçlarının geleneksel ekserji analizinkinden daha nitelikli olduğu anlaşılmıştır. Sonuç olarak sistemin gerçek şartlarda toplam sistem verimi %9,60 iken sistem üzerindeki iyileştirmelerle modifiye ekserji verim %18,26'ya çıkarılabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal Enerji, Güç Üretim Sistemi, Termodinamik Analiz, İleri Ekserji Analizi, Performans İyileştirmesi

ABSTRACT
**DETERMINATION OF THERMODYNAMIC PERFORMANCE
IMPROVEMENT IN A GEOTHERMAL POWER SYSTEM USING THE
ADVANCED EXERGY ANALYSIS**

Harun GÖKGEDİK

Master of Science (M.Sc.)

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Energy

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ali KEÇEBAŞ

November 2013, 60 pages

In recent years, the interest in renewable energy resources, especially geothermal energy has increased due to a decrease in fossil energy resources and the negative environmental impacts. To reduce these negative effects, it has become important to develop more accurate and systematic approaches for improving the design of energy system in usage of geothermal energy. Thus the design of efficient and cost-effective energy conversion systems is an on-going challenge facing energy engineers. In this study, both conventional and advanced exergy analyzes of an existing geothermal binary power system (Bereket Geothermal Power Plant) were conducted. In this way, about the exergy destroyed in the system and its components was collected in-depth information; it was focused on the development by evaluating the thermodynamics performance of the system. By applying the advanced exergy analysis, the interactions between system components (endogenous/exogenous parts) and the actual performance of the reasonable improvement (unavoidable/avoidable parts) were investigated. The result of the study was shown that the primary improved components are ordered as the CON 1, TURB 1 and VAP 2 for the conventional exergy analysis, and the CON 1, CON 2 and PRE-HE 1 for the advanced exergy analysis. It was understood that the results of the advanced exergy analysis are more qualified than those of the traditional exergy analysis. As a result, the modified exergy efficiency can be removed to 18.26% with the improvements made on the system, while total system efficiency is 9.60% in the real conditions of the system.

Keywords: Geothermal Energy, Power Generation System, Thermodynamic Analysis, Advanced Exergy Analysis, Performance Improvement

Sevgili Aileme

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında ileri ekserji analizi kullanılarak jeotermal bir güç üretim sisteminin performansı değerlendirilmiş ve bazı iyileştirmeler için önerilerde bulunulmuştur.

Bu yüksek lisans tezinde öncelikle çalışmalarım boyunca göstermiş olduğu kolaylıklar ve bilimsel bir çalışmanın ve düşünmenin temellerini öğrettiği için Danışmanım ve Hocam Doç. Dr. Ali KEÇEBAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tezin ana hatlarının belirlenmesinde değerli katkılarını esirgemeyen Öğr. Gör. Mehmet TAN'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca bu tez çalışmasında gerekli verileri sağlayan Bereket Enerji Üretim A.Ş. yetkilileri ve çalışanlarına da teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmamın tüm aşamalarında sabırla beni destekleyen değerli ailem, annem Emine GÖKGEDİK ve babam Nail GÖKGEDİK'e minnettar olduğumu belirtmek isterim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	3
1.2. Literatür Taraması	4
2. JEOTERMAL ENERJİ VE KULLANIMI	11
2.1. Jeotermal Enerjinin Kullanım Alanları.....	13
2.2. Jeotermal Enerjinin Dünyadaki Durumu	15
2.3. Jeotermal Enerjinin Türkiye'deki Durumu	15
2.4. Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretimi.....	16
3. JEOTERMAL GÜÇ SİSTEMİNİN TERMODİNAMİK PERFORMANSI	18
3.1. Jeotermal Güç Üretim Sisteminin Tanımlanması	18
3.2. Analiz.....	21
3.2.1. Geleneksel ekserji analizi	22
3.2.2. İleri ekserji analizi.....	25
3.2.2.1. Ekserji yıkım miktarını ayırıştırma	27
3.2.2.2. İçsel ve dışsal kısımlar içerisindeki ekserji yıkımının önlenabilir ve kaçınılmaz kısımlara ayırıştırılması	28
3.3. Jeotermal Güç Üretim Sistemine Ekserji Analizlerinin Uygulanması	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	36
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	48
KAYNAKLAR	51
EKLER	56
Ek A. Sistem bileşenlerin her biri için ekserji yıkımı ve ekserji verimini ifade eden denklemler.....	56
Ek B. Bereket jeotermal güç sisteminin ileri ekserji analizi sonuçları	57
Ek C. Ekserji analizi için Mühendislik Denklem Çözücü (Engineering Equation Solver – EES) ara yüzü	58
ÖZGEÇMİŞ	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak jeotermal enerjinin kullanım alanları (Rinehart, 1980)	14
Çizelge 2.2. Türkiye’de mevcut jeotermal enerji santrallerinin kurulu güç kapasiteleri (EIE, 2009)	16
Çizelge 3.1. Bereket jeotermal güç sisteminin gerçek işletme şartlarında her bir durumu için termodinamik özellikleri ve ekserji miktarı	30
Çizelge 3.2. Gerçek işletme şartlarında geleneksel ekserji analizinin sonuçları	32
Çizelge 3.3. Teorik işlemleri ve kaçınılmaz ekserji yıkımlarını hesaplamak için yapılan varsayımlar	33
Çizelge 3.4. Bereket jeotermal güç sisteminin kaçınılmaz işletme şartlarında her bir durumu için termodinamik özellikleri ve ekserji miktarı	34
Çizelge 3.5. Bereket jeotermal güç sisteminin teorik işletme şartlarında her bir durumu için termodinamik özellikleri ve ekserji miktarı	35

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1.	Bereket jeotermal güç sisteminden bir görünüş (GEKA, 2011)..	19
Şekil 3.2.	Bereket jeotermal güç sisteminin şematik diyagramı.....	20
Şekil 4.1.	Bereket jeotermal güç sisteminin ekserji akış diyagramı.....	37
Şekil 4.2.	Bereket jeotermal güç sistemi bileşenlerinin ekserji yıkım miktarının değişimi.....	38
Şekil 4.3.	Bereket jeotermal güç sistemi bileşenlerinin ekserji verimlerinin değişimi.....	39
Şekil 4.4.	Sistem bileşenlerinin içsel ve dışsal ekserji yıkımlarının değişimi.....	40
Şekil 4.5.	Sistem bileşenlerinin önlenebilir ve kaçınılmaz ekserji yıkımlarının değişimi.....	42
Şekil 4.6.	Sistem bileşenlerinin kaçınılmaz içsel ve dışsal ekserji yıkımlarının değişimi.....	43
Şekil 4.7.	Sistem bileşenlerinin önlenebilir içsel ve dışsal ekserji yıkımlarının değişimi.....	43
Şekil 4.8.	İleri ekserji analizi için sistem bileşenlerinin toplam ekserji yıkımlarının dağılımı: (a) İçsel ve dışsal, (b) Kaçınılmaz ve önlenebilir, (c) Kaçınılmaz içsel ve dışsal, (d) Önlenebilir içsel ve dışsal.....	44
Şekil 4.9.	Sistem bileşenlerinin modifiye ekserji değişimi.....	45
Şekil 4.10.	Geleneksel ve ileri ekserji analizleri için sistem bileşenlerinin ekserji verimlerinin değişimi.....	46
Şekil 4.11.	Geleneksel ve ileri ekserji analizleri için sistemin ekserji verimlerinin değişimi.....	47

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

\dot{E}	Ekserji miktarı (kW)
e	Özgül ekserji (kJ/kg)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
h	Özgül entalpi (kJ/kg)
\dot{I}	Ekserji yıkımı miktarı (kW)
\dot{m}	Kütleli debi (kg/s)
P	Basınç (kPa)
\dot{Q}	Birim zamanda ısı geçiş miktarı (kW)
\dot{S}	Entropi üretim miktarı (kW/K)
s	Özgül entropi (kJ/kg)
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$ veya K)
V	Hız (m/s)
\dot{W}	Birim zamanda yapılan iş miktarı (kW)
z	Yükseklik farkı (m)
ε	Ekserji verimi (%)
θ	Akışkanın toplam ekserjisi (kJ/kg)

Üst simgeler

ON	Önlenebilir
KA	Kaçınılmaz
IC	İçsel
DIS	Dışsal

Alt simgeler

Ç	Çevre
ç	Çıkış
g	Giriş
H	Net ekserji transferi
j	Hal noktası
K	Isı kaybı
k	Sistem bileşeni

R	Isıl denge deposu
top	Toplam
tr	Tersinir
U	Ürün veya üretim
Y	Ekserji yıkımı
YA	Yakıt
0	Çevre hali, ölü hal

Kısaltmalar

BUH	Buharlaştırıcı
EES	Engineering Equation Solver
KON	Kondenser
MTA	Maden Tetkik Arama
ON-ISI	Ön ısıtıcı
PO	Pompa
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
TURB	Türbin

1. GİRİŞ

Günümüzde enerji tüketimi gelişmişliğin ölçütlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Gelişmekte olan ülkeler kategorisinde yer alan ülkemizdeki yaşam biçimi her geçen gün artan enerji tüketimi yönünde gelişme göstermektedir (Çetin vd., 2007). Tüm dünyada hızlı bir artış gösteren enerji gereksiniminin büyük bir kısmı, bir süre daha fosil yakıtlar ve hidrolik enerji ile karşılanabilecektir. Fosil yakıtların kısa bir dönemde tükenmesi ve bir süre sonra bunların yerini yeni enerji kaynaklarının alması beklenmektedir. Son yıllarda bütün ülkeler yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesine özen göstermektedir. Ülkemiz yenilenebilir enerji üretimi potansiyeli yüksek olan ülkeler arasında yer almaktadır. Özellikle jeotermal kaynak potansiyeli bakımından dünyadaki en zengin ülkeler arasında yer almaktadır. Ülkemizde en az 10 jeotermal sahanın elektrik üretimine ve bölgesel ısıtmaya elverişli olmasına rağmen ülkemiz jeotermal kaynakların kullanımı açısından ancak dünya sıralamasında 16. sırada yer almaktadır. Jeotermal güç sistemlerinin avantajlarına rağmen birincil enerji kaynaklarının sınırlı olması ve enerji maliyetlerinin hızla artmasından dolayı bu ve pek çok termal sistemlerde enerji kayıplarının belirlenmesinde ekserjetik analizler büyük önem kazanmıştır. Enerji sistemlerinin geliştirilmesi için ekserji analizinin önemli rollerinden biri gerekli bilgiyi enerji sistem tasarımcıları ve operatörlerine sağlamaktır. Ekserji kayıplarının azalması, yani ekserji veriminin artması halinde sistemde gerçekleşecek yıkım, kaynak tüketimi ve kayıp ekserji emisyonları ters orantılı olarak azalacaktır.

Gün geçtikçe birincil enerji kaynaklarının tükeniyor olması ve enerji maliyetlerinin artışı sebebiyle enerji kayıplarının belirlenmesinde ekserjetik analizler büyük önem kazanmaya başlamıştır. Ekserjinin temeli 1870'li yıllara uzanmaktadır. İlk olarak J.W. Gibbs tarafından 1878 yılında ortaya çıkmıştır (Kestin vd., 1980). Ekserji kavramı kelime olarak ilk defa 1953 yılında Z. Rant tarafından kullanılmıştır (Lee, 2001). Ekserji ile eş anlamlı olarak, kullanılabilir enerji (Bruges, 1959), kullanılabilir

iş (Kestin vd., 1980) ve kullanılabilirlik veya maksimum yararlı iş (Rogers ve Mayhew, 1993) kavramları ortaya atılmıştır.

1970'li yıllarda meydana gelen petrol krizinden sonra enerji veriminin tek başına enerjinin ne kadar etkin kullanıldığını ortaya koyamayacağı anlaşılmıştır. İleri ve Gürer (1998) Türkiye'nin 1995'li yıllara kadar olan enerji kullanımının yanı sıra ekserji kullanımını da gündeme getirmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda verimli gibi görünen sistemlerin ekserji analizi yapıldığında aslında ne kadar verimsiz olduklarını ortaya koymuşlardır. Enerjinin gün geçtikçe daha değerli hale gelmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi de arttırmıştır. Özellikle güç ve ısıtma amacı için jeotermal enerjinin kullanımı artmıştır. Jeotermal enerji; yenilenebilir, sürdürülebilir, tükenmez bir enerji kaynağı olması; Türkiye gibi jeotermal enerji açısından şanslı ülkeler için bir öz kaynak teşkil etmesi; temiz ve çevre dostu olması; yanma teknolojisi kullanılmadığı için sifıra yakın emisyonu sebebiyet vermesi; konutlarda, tarımda, endüstride, sera ısıtmasında ve benzeri alanlarda çok amaçlı ısıtma uygulamaları için ideal şartlar sunması; rüzgar, yağmur, güneş gibi meteoroloji şartlarından bağımsız olması; kullanıma hazır niteliği; fosil enerji veya diğer enerji kaynaklarına göre çok daha ucuz olması; arama kuyularının doğrudan üretim tesislerine ve bazen de re-enjeksiyon alanlarına dönüştürülebilmesi; yangın, patlama, zehirlenme gibi risk faktörleri taşımadığından güvenilir olması; % 95'in üzerinde verimlilik sağlaması; diğer enerji türleri üretiminin (hidroelektrik, güneş, rüzgar, fosil enerji) aksine tesis alanı ihtiyacının asgari düzeylerde kalması; yerel niteliği nedeniyle ithalinin ve ihracının uluslararası konjonktür, krizler, savaşlar gibi faktörlerden etkilenmemesi; konutlara fuel-oil, mazot, kömür, odun taşınması gibi problemler içermediği için yerleşim alanlarında kullanımının rahatlığı; gibi nedenlerle büyük avantajlar sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında jeotermal kaynaklı elektrik santrali sistemine ileri ekserji analizi uygulanmıştır. Böylece sistemin daha iyi performans göstermesi için sistem bileşenlerinin iyileştirme potansiyelleri, bileşenler aralarındaki etkileşimler ve enerji tasarrufu yapılabilecek yönler ve potansiyeller belirlenmiş olacaktır. Öncelikle Türkiye'de bulunan bir jeotermal güç sistemi bu analiz için seçilmiştir. Bu sisteme ait gerçek işletme parametreleri (sistem bileşenlerinin giriş ve çıkışlarındaki debi, basınç ve sıcaklık değerleri) toplanmıştır. Elde edilen parametreler kullanılarak

geleneksel ekserji analizi yapılmıştır. Elde edilen geleneksel ekserji analizi sonuçları değerlendirilmiştir. Sonra sistemde sistem bileşenlerinin ekserji yıkımları kullanılarak ileri ekserji analizi değerlendirmeleri yapılmıştır. Geleneksel ekserji analizinde elde edilen bileşen ekserji yıkımı değerleri, ileri ekserji analiz ile içsel/dışsal parçalar ve kaçınılmaz/önlenebilir parçalara bölünecektir. Böylece sistem bileşenlerindeki ekserji yıkımının azaltılmasındaki kaynakları (içsel/dışsal parçalar) ve potansiyeli (kaçınılmaz/önlenebilir parçalar) görülmüş ve anlaşılmıştır. Sistem üzerinde bu sonuçlara göre bazı iyileştirmeler yapılırsa sistem performansının artabileceği görülmüş; ilgililer için bazı kullanım öneri ve tavsiyeleri verilmiştir.

1.1. Amaç ve Kapsam

Hem verimli hem de maliyeti düşük enerji dönüşüm sistemlerinin tasarımı enerji mühendislerinin devamlı karşı karşıya geldiği sorunlardandır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, bu sistemlerden çevreye olan atık etkisini azaltmak için artan ihtiyaç ve enerji için giderek artan küresel talep, enerji sistemlerinin tasarımını geliştirmek için daha doğru ve sistematik yaklaşımlar geliştirmek son derece önemli hale getirmiştir. Bu tez çalışmasında jeotermal güç sistemlerinin tasarımını ve iyileştirilmesinin nasıl yapılacağından bahsedilmektedir. Sistem bileşenleri içinde yok olan ekserji hakkında derinlemesine bilgi sahibi olmak için bu sistemlerin değerlendirmesi ve iyileştirilmesi üzerinde durulmaktadır. Bu sebeple mevcut bir jeotermal güç sistemine ileri ekserji analizi uygulanmıştır. Böylece, sistemlerin iyileştirme potansiyelini, sistem bileşenleri arasındaki etkileşimleri, enerji tasarrufunun yönü ve potansiyeli gösterilmeye çalışılmıştır. Ayrıca bu yöntem ile geleneksel ekserji yöntemi karşılaştırılarak ileri ekserji analiz yoluyla bu termal sistem bileşenleri üzerindeki iyileştirmelerden bahsedilmiştir.

Günümüzde jeotermal güç sistemlerinin avantajlarına rağmen birincil enerji kaynaklarının sınırlı olması ve enerji maliyetlerinin hızla artmasından dolayı bu ve pek çok termal sistemlerde enerji kayıplarının belirlenmesinde ekserjetik analizler büyük önem kazanmıştır. Ekserji kayıplarının azalması, yani ekserji veriminin artması halinde sistemde gerçekleşecek yıkım, kaynak tüketimi ve kayıp ekserji

emisyonları ters orantılı olarak azalacaktır. Bu tez çalışmasında ise jeotermal kaynaklı güç sistemine ileri ekserji analizi uygulanmıştır. Böylece sistemin daha iyi performans göstermesi için sistem bileşenlerinin iyileştirme potansiyelleri, bileşenler aralarındaki etkileşimler ve enerji tasarrufu yapılabilecek yönler ve potansiyeller belirlenmiştir.

1.2. Literatür Taraması

Günümüzde yaşamımızın bir parçası haline gelen enerji, madde veya maddeler sisteminin iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanır. Tarihi süreçte insanlar önce ısınma, yemek pişirme gibi ihtiyaçlarını karşılamak için; sonra gelişen endüstri ile birlikte enerjiye olan gereksinimleri gün geçtikçe artmış ve artmaya devam etmektedir. Dolayısıyla enerji kullanımı arttıkça beraberinde küresel ısınma ve kirlenme gibi birçok çevresel sorunu da getirmektedir. Çoğunlukla fosil kaynaklı yakıtların sebep olduğu bu sorunlara karşın, hidrolik, güneş, rüzgar, jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını gündeme getirmiş ve bilhassa 1973'teki petrol ambargosundan sonra, bu konudaki araştırmalara hızla yer verilmiştir. Gelişmekte olan ülkeler arasında olan ülkemizde, enerji tüketimi hızla artmakta ve enerji ihtiyacının çoğu dışa bağımlı olarak karşılanmaktadır. Dünyadaki aşırı nüfus artışı, sanayileşme ve bunun sonucu yaşam standartlarının yükselmesi olarak ifade edilen enerji tüketimi yalnız ülkemiz için değil tüm dünya ülkeleri için en önemli sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Öte yandan fosil yakıtların ömrü kesin olarak bilinmemekle beraber her geçen gün azalma eğiliminde olduğu ve giderek tükeneceği doğrultusunda bir beklenti vardır. Sonuçta üretimin tüketimi karşılayamama gibi bir durumla karşı karşıya gelmemiz ve bu dengenin olumsuz yönde bozulması söz konusudur. Bu nedenlerden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına özellikle jeotermal enerjiye bir yönelme vardır.

Eski çağlardan beri şifa için kullanılan doğal sıcak su kaynakları, 1800'lü yıllarda ilk defa Amerika'da jeotermal ısıtma amaçlı olarak değerlendirilmiştir. Daha sonra 1905 yılında Larderello (İtalya) yöresinde yine ilk defa jeotermal buhardan elektrik üretimine başlanmış ve 1912 yılında gücü 25 kW_e olan ilk turbo jeneratör

kurulmuştur. 1930'larda ise bu enerji İzlanda'nın Reykjavik kentinde yine ısıtma amacıyla kullanılmaya başlamış; 1949 yılında Yeni Zelanda Wairakei sahasında turistik bir otele sıcak su temini amacıyla başlanan sığ sondajlara daha sonra elektrik elde edebilmek amacıyla devam edilmiş ve 1954 yılında 200 MW_e kapasiteli bir santral kurulmuştur. 1960'da Amerika'da, 1961'de Meksika'da ve 1966'da Japonya'da santraller kurularak jeotermal enerjinin kullanımında önemli gelişmeler sağlanmıştır (DPT, 1996).

20. yüzyıl başına kadar sağlık ve yiyecekleri pişirme amacı ile yararlanılan jeotermal kaynakların kullanım alanları gelişen teknolojiye bağlı olarak günümüzde çok yaygınlaşmış ve çeşitlenmiştir. Bunların başında elektrik üretimi, ısıtmacılık ve endüstrideki çeşitli kullanımlar gelmektedir.

Bugün için jeotermal enerjinin, dünya enerji sektöründeki payı sadece %0,2'dir. Ancak, ülkelere göre bu oran büyük ölçüde değişiklik gösterebilmektedir. Örneğin Filipinler'de jeotermal santraller, toplam kapasitenin %17'sini oluşturmaktadır (DPT, 1996). 1996 yılı rakamlarıyla dünyada 220 trilyon TL'lik petrol eşdeğeri jeotermal ısıtma gerçekleştirilmektedir. Burada ABD tek başına 1 katrilyon 467 trilyon TL eşdeğeri ısıtma hedeflemektedir. Dünyada jeotermal enerjiye dayalı elektrik üretimi kurulu güç kapasitesi, 1998 yılı rakamlarıyla 22 ülkede 8600 MW_e'ye ve ısıtma amaçlı doğrudan kullanımda ise, 1997 yılı verilerine göre, 11300 MW_t'a ulaşmıştır (ÖRME, 1999).

Türkiye jeotermal potansiyeli bakımından, Avrupa'nın 1'nci, Dünyanın 7'nci ülkesi konumundadır. Dünyada jeotermal zenginliği ile yedinci sırada yer alan Türkiye, jeotermal potansiyeli ile toplam elektrik enerjisi ihtiyacının %5'ine kadar, ısıtmada ısı enerjisi ihtiyacının %30'una kadar karşılayabilecektir. Ancak bunların ağırlık ortalaması alındığında Türkiye enerji (elektrik+ısı enerjisi) ihtiyacının %14'ünü karşılamaya taliptir. Toplam jeotermal potansiyelimizin (2000 MW_e, 31500 MW_t) elektrik üretimi, şehir ısıtma, soğutma, sera ısıtma, termal tesis ısıtma, kaplıca kullanımı, kimyasal maddeler üretimi, sanayiye kullanım vb şeklidir.

Alp-Himalaya tektonik kuşağı üzerinde bulunan ülkemiz, İzlanda ve Japonya ile beraber en zengin jeotermal kaynaklara sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Jeotermal enerji kaynakları sıcaklıklarına bağlı olarak başta elektrik üretimi olmak

üzere, ağırlıklı olarak ısıtmacılıkta (konut, sera, termal tesis ısıtması), endüstriyel uygulamalar, termal turizm-tedavi ve kültür balıkçılığında kullanılmaktadır. Türkiye’de bilinen 1000 dolayında sıcak su ve mineralli su kaynağı ile jeotermal kuyu mevcuttur. Sıcaklığı 40°C’nin üzerinde olan jeotermal sahaların sayısı ise 170’dir. Bunların 11 tanesi yüksek sıcaklık saha olup konvansiyonel olarak elektrik üretimine uygundur (Aydın-Germencik (232 °C), Manisa-Salihli-Göbekli (182 °C), Çanakkale-Tuzla (174 °C), Aydın-Salavatlı (171 °C), Kütahya-Simav (162 °C), İzmir-Seferihisar (153 °C), Manisa-Salihli-Caferbey (150 °C), Aydın-Yılmazköy (142 °C) İzmir-Balçova (136 °C) İzmir-Dikili (130 °C)) (EIE, 2013). Türkiye’de elektrik üretimine uygun jeotermal alanlardan sadece Denizli-Kızıldere Sahasında 20 MW gücünde santral kurulmuş olup 12 MW elektrik üretimi yapılmaktadır. Ülkemizde jeotermal sahalar büyük bir çoğunlukla orta ve düşük sıcaklıklı sahalardır ve bilinen jeotermal sahaların %95’i hacim ısıtma uygulamalarına uygundur. Türkiye’nin muhtemel jeotermal ısı potansiyeli 31500 MW_t olarak tahmin edilmektedir. 2005 yılı sonu itibarıyla MTA tarafından yapılan jeotermal sondajlara göre muhtemel potansiyelin 2924 MW_t’ı görünür potansiyel olarak kesinleştirilmiştir. Türkiye’deki doğal sıcak su çıkışlarının 600 MW_t olan potansiyeli de bu rakama dahil edildiğinde toplam görünür jeotermal potansiyel 3524 MW_t ulaşmaktadır (MTA, 2005).

Türkiye’de jeotermal enerji ile ısıtılacak potansiyel yerleşim birimlerinin toplamının meydana getirdiği 945 bin konutluk kapasite, sadece şehir ısıtmasına yöneliktir. Sera ve kaplıca ısıtma, soğutma, endüstriyel kullanım, mineral elde edilmesi, balık üretimi v.b. için kullanılan enerji bu değer dışındadır. Bazı Jeotermal kaynaklarımızın yerleşim birimlerine uzaklığı ve küçük yerleşim birimleri olmaları nedeniyle 5 Milyon konut eşdeğeri ısı potansiyelinin yaklaşık 1 Milyon konutu bugünün şartlarına göre ısıtma amaçlı olarak değerlendirilebilecektir. Ancak jeotermal sahalarla yakın bölgelerde sera ısıtması, endüstriyel kullanım, kaplıca maksatlı kullanım, kimyasal madde üretimi, balık çiftlikleri v.b. uygulamaları uygulamak mümkündür. 2003 yılı sonu itibarıyla jeotermal enerji ile ısıtılan yerleşim birimleri ise şöyledir. Gönen 3400 konut, Simav 3200 konut, Kırşehir 1800 konut, Kızılcahamam 2500 konut, Balçova 11500 konut, Afyon 4500 konut, Kozaklı 1000 konut, Sandıklı 2000 konut, Diyarbakır 400 konut, Narlıdere 1500, Salihli 2000 konut

jeotermal merkezi ısıtma sistemine ilaveten termal tesis ve 565 dönüm sera ısıtması (Şanlıurfa, Balçova vb) şeklindedir (Dağdaş, 2004).

Hem verimli hem de maliyeti düşük jeotermal güç ve ısıtma sistemlerinin tasarımı enerji mühendislerinin devamlı karşı karşıya geldiği sorunlardandır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, bu sistemlerden çevreye olan atık etkisini azaltmak için artan ihtiyaç ve enerji için giderek artan küresel talep, enerji sistemlerinin tasarımını geliştirmek için daha doğru ve sistematik yaklaşımlar geliştirmek son derece önemli hale gelmiştir. Özellikle ekserji analizi, bir işlemi gerçekleştirmek (tersinmezlikler nedeniyle) için kullanılan ekserji tüketiminin ve çevreye ekserji taşınması yani ekserji kayıplarının tanımlanması ve miktarının belirlenmesi ile ilgilidir. Bu gerçek yetersizlikler bir sistemin iyileştirme alanlarını aydınlatılabilir. Yıllar boyunca bu tür bir analiz kapsamlı olarak ele alınmıştır ve termal sistemlere uygulanmıştır. Geleneksel ekserji analizleri ile jeotermal güç ve ısıtma sistemlerinin değerlendirilmesi ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bunlar şöyle özetlenebilir: Özgener vd. (2005a) Gönen Jeotermal Bölgesel Isıtma Sisteminin enerji ve ekserjiye dayalı performans değerlendirmesi açıklamıştır. Ekserji kayıpları referans sıcaklık 6 °C'de alınarak hesaplamıştır. Ekserji kayıpları pompalarda %14,81, ısı değiştiricilerde %7,11, dağıtım hattında %1,06, re-enjeksiyonda %12,96 olarak bulmuştur. Gönen Jeotermal Bölgesel Isıtma Sisteminin enerji ve ekserji verimlilikleri sırasıyla %45,91 ve %64,06 olarak tespit etmiştir. Özgener vd. (2005b) jeotermal bölge ısıtma sistemlerinin enerji ve ekserji bakış açılarından değerlendirilmesinde kullanılan söz konusu performans parametrelerini analiz etmişlerdir. Enerji ve ekserji modellerini, Balçova-İzmir, Salihli-Manisa ve Gönen-Balıkesir'de bulunan üç farklı jeotermal bölgesel ısıtma sistemi üzerinde uygulamışlardır. Jeotermal bölge ısıtma sistemlerinin performans parametrelerinden; özgül ekserji göstergesi, enerji ekserji verim eşitlikleri ve termodinamik parametrelere yer vermişlerdir. Özgener vd. (2005) Balçova Jeotermal Bölgesel Isıtma Sistemini, termo-mekanik ekserji analizi, mevcut sistem verileri ile gerçekleştirilmiştir. Bölgesel ısıtma sisteminin performansı, enerji ve ekserji verimlilikleri ve ekserji kayıplarının değerlendirilmesi yapmıştır. Balçova Jeotermal Bölgesel Isıtma Sistemi kapsamındaki ekserji kayıpları, ekserji akış diyagramında göstermiştir. Enerji ve ekserji akış diyagramları karşılaştırmıştır. Sistemde ekserji

kayıpları, kuyu ve devir daim pompalarda kaybolan akışkanın ekserjisinde, ısı değiştirici kayıplarında, re-enjekte edilen termal suyun (jeotermal akışkan) ekserjisinde ve sistemin doğal direkt deşarjında gözlemiştir. Balçova Jeotermal Bölgesel Isıtma Sistemi kapsamında enerji ve ekserji verimlilikleri, sistem performans analizi ve gelişimi için araştırmıştır ve sırasıyla %37,60 ve %42,94 olarak bulmuştur.

Köse (2005a) Kütahya-Simav'daki mevcut jeotermal enerji kaynaklarının potansiyelini ve verimliliğini incelemiştir. Simav-Eynal arasındaki jeotermal akışkanın ısısı bölgesel ısıtma sistemi için çok yüksek olması sebebiyle elektrik enerjisi üretimi ihtimalini araştırarak fizibilite çalışmalarını yapmıştır. Çevresel sebepler yüzünden bu ikili güç ünitesinde çalışan akışkan olarak HCFC-124 seçilmiştir. Kütahya-Simav jeotermal enerji ünitesi olarak 2,9 MW_e kapasite ile çalışabileceği ve minimum 17020 MWh/yıl elektrik enerjisi üretebileceğini ifade ederek ön fizibilite çalışmaları sonucunda projenin uygun ve yapılabilir durumda olduğunu belirtmiştir. Köse (2005b) jeotermal enerjinin elektrik enerjisi üretiminde kullanımını ve Kütahya-Simav bölgesinde var olan jeotermal enerji kaynaklarından elektrik enerjisi elde etmenin kullanılabilirliğini araştırmıştır. Teorik olarak tasarımı yapılan santralde, jeotermal akışkanın düşük sıcaklık ve sıvı ağırlıkta olması nedeniyle binary çevrimi kullanılmış ve bu santralde akışkan olarak R-134a seçilmiştir.

Etemoğlu ve Can (2006) Türkiye'deki jeotermal kaynakları ekserji analizlerine göre sınıflandırmışlardır. Jeotermal kaynakların ekserji değeri 0,56'dan yüksek olduğunda yüksek ekserji kaynağı kabul etmişlerdir. Ekserji değeri 0,05'ten düşük olduğunda, ekserji değeri orta kabul etmişlerdir. Ekserji olarak yapılan sınıflandırma ile jeotermal kaynakların kullanım alanları belirlemişlerdir. Hepbaslı ve Özgener (2006) yenilenebilir enerjinin sadece Türkiye için değil dünya için de gelecek açısından anahtar kaynak olduğunu belirterek jeotermal enerjinin Türkiye'deki uygulama alanlarını, kapasitelerini ve dünyadaki sıralamaları hakkında bilgi vermişlerdir. Öztürk vd. (2006) Denizli, Kızıldere jeotermal güç sisteminin ekserji analizini ele almışlardır. Çalışma sonucunda yazarlar Kızıldere jeotermal güç sistemlerinin ekserji verimini %17,2'den %24'e yükseltmişlerdir. Özgener vd. (2006) Manisa Salihli ilçesindeki jeotermal bölgesel ısıtma sistemi ile İzmir Balçova beldesindeki jeotermal

bölgesel ısıtma sisteminin ekserji analizini yapmıştır. 2003 ve 2004 mevcut sistem verilerini kullanarak performans değerlendirilmesi ve sistem analizi gerçekleştirmiştir. Ekserji kayıplarının büyük çoğunlunun kuyu ve devir daim pompalarında ve ısı değiştiricilerde olduğunu belirtmiştir. Enerji verimlilikleri sırasıyla, Balçova jeotermal bölgesel ısıtma sistemi %39,36 ve Salihli jeotermal bölgesel ısıtma sistemi %59,31 olarak bulunmuştur. Enerji iyileştirilmesinde re-enjeksiyonun iyi uygulanması gerektiği ortaya çıkmıştır.

Bugün termal işlem sanayinde en ayrıntılı ve etkili yöntemler için termodinamik verimliliği artırmanın yanında enerji tüketimini, ürün maliyetleri ve sera gazı emisyonlarını azaltılmasına yönelik ekserjetik, ekserjoekonomik ve ekserjoçevresel yaklaşımlara (yani ekserji tabanlı metotlar) dayanan analizler ve değerlendirmeler sunulmaktadır. Tsatsaronis vd. (2002; 2006) enerji dönüşüm sistemlerinin analizi ve değerlendirmesi için şimdiye dek yapılmış çalışmalarla yararlı olduğunu kanıtlayan sözde geleneksel ekserji tabanlı yöntemleri geliştirmek için ekserji yıkımı, yatırım maliyeti ve çevresel etki oranlarını içsel/dışsal ve kaçınılmaz/önlenebilir parçaya bölünmesini önermişlerdir ve bu işleme “ileri ekserji tabanlı yöntemler” olarak adlandırılmıştır.

Bir sistem bileşenin termodinamik davranışı büyük ölçüde bağlı olduğu bileşenlerin özellikleri ile ilgili olup, bu durumda farklı bileşenler arasındaki etkileşimler de büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, teknik ve ekonomik sınırlamalar ve üretim yöntemleri nedeniyle her bir bileşen gerçek enerji tasarrufu potansiyelini belirleyen en iyi ulaşılamaz termodinamik davranışa sahiptir. Böylece ileri ekserji analizi, ekserji yıkımının azaltılmasındaki kaynakları (içsel/dışsal parçalar) (Tsatsaronis ve Park, 2002; Cziesla, 2006) ve potansiyeli (kaçınılmaz/önlenebilir parçalar) (Kelly vd., 2009) ortaya çıkarmak için uygulanır. Bahsedilen parçalar içinde ekserji yıkımı miktarını gösteren bölme yöntemi daha ayrıntılı olarak referanslar (Morosuk ve Tsatsaronis, 2008a; Morosuk ve Tsatsaronis, 2009; Tsatsaronis ve Morosuk, 2010; Morosuk ve Tsatsaronis, 2011; Petrakopoulou vd., 2012) da ele alınmıştır.

Bu tezdin önce yapılan kimi bilimsel çalışmalar özetlenecek olursa; Morosuk ve Tsatsaronis (2008a) enerji dönüşüm sistemlerinde ekserji yıkımını içsel/dışsal ve önlenebilir/kaçınılmaz parçalara bölmek için yeni bir yaklaşım önermiştir. Bir soğutma makinesinin en karmaşık türü olan absorpsiyonlu soğutma makinesine bu

geliştirilen yöntemi uygulamış ve termodinamik yetersizlikleri de bildirmiştir. Başka bir çalışmada, Morosuk ve Tsatsaronis (2009) ileri ekserji analizini çeşitli çalışma akışkanları ile çalışan buhar sıkıştırma soğutma makineleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, geleneksel ekserji analizine dayalı olarak karşılaştırılmışlardır. Buhar sıkıştırma bir soğutma makinesinin termodinamik performansını artırmak için ilk olarak evaporatör ve sonra kompresörün iyileştirilmesi gerektiği bildirmişlerdir. Petrakopoulou vd. (2012) geleneksel ve ileri ekserjetik analiz yöntemlerini kullanarak bir kombine çevrim güç santralini analiz etmişlerdir. Ekserjetik analizde yüksek ekserji yıkımı değerlerine sahip bileşenleri açıklayan değişkenleri kullanılır. Ayrıca santral bileşenlerinde ekserji yıkımının çoğunun gaz türbini sistemi genişleticisi ve yüksek basınçlı buhar türbini hariç tüm bileşenlerde kaçınılmaz olduğunu bildirdiler. En yüksek ekserji yıkımına yanma odasına neden olmuştur. Bu bileşendeki toplam ekserji yıkımının %68 (kaçınılmaz ekserji yıkımı) kaçınılmazken toplam ekserji yıkımının yaklaşık %87'si ise bileşenin kendi (içsel ekserji yıkımı) çalışmasından kaynaklanmıştır. Morosuk vd. (2012) iki aşamalı buhar sıkıştırma ticari soğutma makinelerine alternatif bir işlem olarak buzdolaplarında Voorhees sıkıştırma işlemini kullanılır. Bu işlem, ilk olarak sabit bir toplam hacim ve daha sonra yakın izentropik koşullarda bir sıkıştırma işleminin bir kombinasyonudur. İleri analizin bulguları benzer soğutma sistemleri üzerinde çeşitli çalışmalar ile teyit edilse de ilk kez geleneksel ve ileri ekserjetik analizler ve değerlendirmeler yapılmıştır.

2. JEOTERMAL ENERJİ VE KULLANIMI

Jeotermal kaynak kısaca yerkürenin iç ısısidir. Yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş ısı ile çeşitli kimyasallar içeren, farklı basınçlar altında bulunabilen sıcak su, buhar ve gazlardır. Yerin altındaki kayaçlarda biriken ısının jeotermal akışkan ile taşınıp rezervuarlarda depolanmasından oluşan sıcak su, buhar ve kuru buhar ile kızgın kuru kayalardan yapay yollarla elde edilen ısı enerjisine jeotermal enerji denir. (ETKB, 2013). Kayaç, mineral topluluklara verilen genel addır. Tek bir mineralin çok sayıda birikiminden ya da farklı minerallerden, taş parçacıklarından meydana gelir. Kayaçlar oluştukları esnada bulunduğu doğal ortama dair bilgi içerirler. Bu sayede yer kabuğunun jeolojik gelişimi çeşitli kayaçların analiz edilmesiyle incelenebilmektedir (Kılıç ve Kılıç, 2013).

Aktif kırık sistemleri ile volkanik ve magmatik yatakların yakınında olduğu çok sık görülen jeotermal kaynaklardan elde edilen enerji; yeni, yenilenebilir, güvenilir, sürdürülebilir, çevre dostu, ucuz, yerli ve yeşil bir enerji türüdür. Yerküreyi ısı motoru olarak düşünürsek, motorun çalışmasında etken rolü madde ve enerji almaktadır. Isı motorunun içine enerjiyi taşıyan çoğu zaman ısı motorunun kendisinden türeyen katı veya kısmen erimiş kayaçlar veya sudur. Isı motorunun iş yapmasına imkan tanıyan ve kendi maddesini tekrar düzenleyen enerji ise, iç ısı enerjisidir (Elder, 1981).

Jeotermal kaynaklarla ilk kez 1904 yılında İtalya'da Larderello bölgesinde, elektrik üretici denenmiştir. Bu çalışmaların sonucunda dünyada ilk kez 1911 yılında ticari elektrik üretim santrali kurulmuştur (Kılıç ve Kılıç, 2013). Ayrıca, Japonya Beppu'da ve Amerika'da Geysir'lerde elektrik üretim denemeleri yapılmıştır. Yeni Zelanda'da Wairakei istasyonu 1958 yılında İtalya'dan sonraki en büyük ikinci endüstriyel üretimi gerçekleştirmiştir. Wairakei santralinde ilk kez çürük buhar teknolojisi kullanılmıştır. 1960'lı yıllarda ilk jeotermal elektrik santrali Kaliforniya'da Geysir'lerde kurulmuştur. İlk iki elemanlı çevrim santrali 1967 yılında Rusya'da

faaliyetine başlamıştır. Bu yıllarda daha hızlı ve düşük kaynak sıcaklıklarında elektrik üretimi çalışmaları yapılmıştır. Düşük sıcaklıklı olarak 570 °C'de elektrik üretimi, 2006 yılında Alaska, Chena Hot Springs bölgesinde gerçekleştirilmiştir (Çentez, 2013).

Jeotermal enerji, CO₂, NO_x, SO_x gazlarının salınımı bakımından özellikle de yeni modern santrallerle çevreye çok düşük seviyede zarar veren temiz bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Sıcaklığı 20-70 °C arasında bulunan düşük sıcaklıklı sahalar yoğun olarak ısıtmacılıkta, endüstride ve kimyasal madde üretiminde kullanılmaktadır. Sıcaklığı 70-150 °C arasındaki orta sıcaklıklı sahalar ile 150 °C'nin üstündeki yüksek sıcaklıklı sahalar ise elektrik üretiminde kullanıldıktan sonra re-enjeksiyon koşullarına göre ısıtma uygulamalarında yararlanılabilmektedir (Özcan, 2011). Jeotermal rezervuarlardan yapılan sondajlı üretimlerde jeotermal akışkanın çevreye atılmaması ve rezervuarı beslemesi bakımından, işlevi tamamlandıktan sonra tekrar yeraltına gönderilmesi (re-enjeksiyon) zorunludur. Re-enjeksiyon birçok ülkede yasalarla zorunlu hale getirilmiştir (Türkiye Jeotermal Derneği, 2007). Bu yüzden beslemenin üzerinde kullanım olmadıkça jeotermal kaynakların azalması söz konusu değildir.

Strateji Geliştirme Başkanlığının 14 Kasım 2012 tarihinde hazırladığı belgelere göre, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının 2013 yılı bütçe sunumunda belirttiği rakamlarla, Türkiye dünya ülkeleri arasında, jeotermal enerji kapasitesi bakımından on ikinci sırada yer almaktadır (ETKB, 2013). Elektrik enerjisi üretiminin, birincil enerji kaynaklarına göre dağılımında jeotermal enerji %0,3 olarak yer almaktadır (2012 yılı Eylül ayı sonuna göre). 2002 yılsonu rakamlarına göre 17,5 MW olan jeotermal kurulu gücü, 2012 yılı Eylül ayı sonunda 114,2 MW değerine ulaşarak kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımında yaklaşık %0,2 ile kapasitenin çok altında kalmıştır.

Jeotermal enerji kaynakları bakımından oldukça zengin olan ülkemizde, jeotermal enerji üretimine daha fazla ağırlık verilmelidir. Hızlı gelişen Türkiye'nin dünyadaki yenilenebilir enerji üretimlerinde hak ettiği üst sıralardaki yerini alması için diğer yeşil enerji türleri gibi jeotermal enerjinin de doğru ve etkin değerlendirmelerle üretimi ve kullanımı arttırılmalıdır.

2.1. Jeotermal Enerjinin Kullanım Alanları

Yerkürenin ısısı, yer kabuğundaki kırık veya çatlaklarda dolaşan sular ile yeryüzüne aktarılır. Yer kabuğunda doğal su dolaşımını sağlayacak yeterli kırık olmadığında veya ısı birikimi belli bir bölgede tespit edilirse, yapay kırıklar oluşturularak dolaştırılan akışkanlardan enerji elde edilebilir. Depremlerin etkin olduğu, tektonik olarak aktif olan genç volkanların bulunduğu kuşaklarda yer alan jeotermal enerji sahalarında yeryüzüne ulaşan buhar ve sıcak suyun içerdiği enerji doğrudan ya da başka enerji türlerine dönüştürülerek kullanılır (Çetiner, 2013).

Elektrik enerjisi üretiminde, konutların, seraların ısıtmasında, soğutmada, endüstride (süt, ilaç, deri, kimyasal madde eldesi vb.) ve sağlık turizmi kapsamında kaplıca turizminde kullanımıyla pek çok kullanım sahası olan jeotermal enerji kullanımı dolaylı (elektrik enerjisi üretimi) kullanım ve doğrudan kullanım olarak iki ana grupta toplanabilir. Endüstriyel kullanım ile konut ısıtması ve seracılık, sağlık, turizm vb. konuları içermek üzere kendi arasında da iki ana gruba ayrılır. Yeryüzüne çıkan jeotermal akışkanlardan elde edilen ürünlere örnek verilirse İtalya, Amerika, Japonya, Filipinler ve Meksika borikasit, amonyum bikarbonat, ağır su (döteryum oksit), amonyum sülfat, potasyum klorür gibi kimyasal maddeler elde etmektedirler. Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak kullanım alanları Çizelge 2.1'de verilmektedir (Rinehart, 1980).

Jeotermal enerjinin doğrudan olmayan kullanımı ise jeotermal enerjiyle elektrik üretimi yoluyla gerçekleşmektedir. Jeotermal kaynaklarda birçok araştırma teknikleri sonucunda yapılan sondajlarla bulunan, aşırı derecede ısınmış sular, yağ ve kuru buhar olarak yeryüzüne çıkarılmaktadır. Jeotermal akışkan, üzerindeki basıncın azalmasıyla su ve buhar fazlarına ayrılmaktadır. Ayrılan buhar, jeotermal santrallere gönderilerek, elektrik enerjisine dönüştürülmekte, atık su ise, diğer ısıtma sistemlerinde kullanılmakta veya yer altına geri basılmaktadır. Yağ buhar, buhar yüzdesinin ve entalpisinin yüksek olması durumunda elektrik üretimi için daha verimli olmaktadır. Yer kabuğunun derinliklerinden elde edilen kızgın kuru buhar ise, doğrudan jeotermal santrallere gönderilerek elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Elektrik üretimi için en elverişli jeotermal kaynaklar, yüksek

sıcaklıklı ve yüksek entalpili kuru buhar sistemleridir. Bunların sıcaklıkları 250 °C-380 °C arasında değişmektedir (Aksoy, 2012).

Çizelge 2.1. Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak jeotermal enerjinin kullanım alanları (Rinehart, 1980).

Sıcaklık (°C)	Jeotermal Akışkanın Kullanım Alanları
180	Elektrik enerjisi üretimi, amonyak absorpsiyonu ile soğutma, yüksek konsantrasyonda buharlaştırma, kağıt sanayi
170	Elektrik üretimi, ağır su ve hidrojen sülfid prosesleri, diatomik malzeme kurutma
160	Konvensiyel güç üretimi, kereste ve balık kurutma
150	Konvensiyel güç üretimi, Bayer yöntemi ile alüminyum eldesi
140	Konvensiyel güç üretimi, tarım ürünlerinin hızlı kurutulması
130	Konvensiyel güç üretimi, şeker rafinasyonunda buharlaştırma
120	Distilasyon ile temiz su eldesi, tuz elde edilmesi, şeker sanayi, damıtma prosesleri
110	Çok yönlü buharlaştırma, yün yıkama ve kurutma, çimento kurutulması
100	Meyve, sebze ve küspe kurutma
90	Hacim ısıtılması
80	Lityum bromür yöntemi ile soğutma
70	Endüstri proses suyu
60	Sera, ahır, kümes ısıtılması
50	Mantar yetiştirme
40	Toprak ısıtma
30	Yüzme havuzları, turizm, sağlık amaçlı banyolar
20	Balık çiftlikleri

Jeotermal enerjinin kullanıldığı alanlar, bölge şartlarına ve özellikle de akışkan sıcaklığına göre büyük farklılıklar göstermektedir. Bu yüzden, Jeotermal enerjinin bulunduğu yerde değerlendirilmesi ekonomikliği artıracığından, akışkan kaynağa en yakın bölgede kullanılmalıdır (Şimşek, 1998).

2.2. Jeotermal Enerjinin Dünyadaki Durumu

Dünyada jeotermal enerjiden çok uzun süredir yararlanılmaktadır. İlk çağlardan 20. yüzyılın başına kadar sağlık amaçlı olarak kullanılan jeotermal kaynaklardan ilk defa F. Larderel İtalya'da 1818 yılında jeotermal buhar kullanarak Borik Asit elde etti. Jeotermal enerjiden elektrik üretimi ilk olarak 1904 yılında İtalya Lardrello sahasından kuru buhar üretimiyle başlamıştır. 1912 yılında ilk kurulan turbo jeneratör ile 250 kW_e elektrik üretilmiştir. Jeotermal rezervleri bakımından dünyanın en zengin ülkesi olan İzlanda'da ise 1930'larda bu enerji Reykjavik kentinde ısıtma amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. 1950'lerde Yeni Zelanda'da ki Wairakei'de bir otel ısıtmasıyla başlayan sondajlar daha sonra elektrik enerjisi elde etmek için çalışmalara devam etmiş ve 1954 yılında 200 MW_e kapasiteli bir santral kurulmuştur. 1960'da Amerika'da, 1961'de Meksika'da ve 1966'da Japonya'da 1970'de Çin'de santraller kurularak jeotermal enerjinin kullanımında önemli gelişmeler sağlanmıştır. 1980'lerde Rankine çevrimiyle çalışmalar sürdürülmüştür (Serpen, 2005; Türkiye Jeotermal Derneği, 2007).

Dünyada jeotermal enerji kurulu gücü 9700 MW, yıllık üretim 80 milyar kWh olup, jeotermal enerjiden elektrik üretiminde ilk 5 ülke; ABD, Filipinler, Meksika, Endonezya ve İtalya şeklindedir. Elektrik dışı kullanım ise 33000 MW'tır. Dünya'da jeotermal ısı ve kaplıca uygulamalarındaki ilk 5 ülke ise Çin, Japonya, ABD, İzlanda ve Türkiye'dir. Dünyada jeotermal elektrik santrallerin kurulu güç kapasitesi, 1975'de 1300 MW iken 2007'de 9732 MW'a yükselmiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2009).

2.3. Jeotermal Enerjinin Türkiye'deki Durumu

Türkiye Alp-Himalaya kuşağı üzerinde yer aldığından oldukça yüksek jeotermal potansiyele sahip olan bir ülkedir. Ülkemizin jeotermal potansiyeli 31500 MW'tır. Ülkemizde potansiyel oluşturan alanlar Batı Anadolu'da (%77,9) yoğunlaşmıştır. Bu güne kadar potansiyelin %13'ü (4000 MW) Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından kullanıma hazır hale getirilmiştir. Jeotermal enerji

potansiyelimizin 2000 MW'lık bölümünün elektrik enerjisi üretimi için uygun olduğu değerlendirilmekte olup kesinleşen şu an için 93 MW'tır. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİE)'nin Mayıs 2009 verilerine göre ülkemizdeki mevcut kurulu güç santralleri Çizelge 2.2'de gösterilmektedir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2009; EİE, 2009).

Çizelge 2.2. Türkiye'de mevcut jeotermal enerji santrallerinin kurulu güç kapasiteleri (EİE, 2009).

Jeotermal Saha	Kurulu Güç	Sıcaklık (C°)	İşletme Durumu	Lisans Alan Şirket
Denizli-Kızıldere	20,2 MW	242	İşletmede	Zorlu Enerji A.Ş.
Aydın-Sultanhisar	7.95 MW	162	İşletmede	Menderes Jeotermal Elektrik Üretim A.Ş.
(Dora-1) Aydın-Sultanhisar	9,5 MW	162	İnşa halinde	Menderes Jeotermal Elektrik Üretim A.Ş. tarafından lisans alınmıştır.
(Dora-2) Aydın-Germencik	47,4 MW	232	İşletmede	Gürmat Elektrik Üretim A.Ş. tarafından lisans alınmıştır.
Çanakkale-Tuzla	7,5 MW	174	İnşa halinde	Tuzla Üretim A.Ş. tarafından lisans alınmıştır.
Denizli-Kızıldere (Kızıldere Jeotermal Sahasının atığı olan sudan)	6,85 MW	140	İşletmede	Bereket Jeotermal Üretim A.Ş.

2.4. Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretimi

Jeotermal elektrik üretiminde, jeotermal kaynaklar aracılığıyla elektrik üretimi yapılır. Teknolojik yapı olarak; kuru buhar santralleri, çürük buhar santralleri ve iki elemanlı çevrim santralleri görev alır. Jeotermal elektrik üretimi bugün dünyada yaklaşık 24 ülkede gerçekleştirilmekte ve jeotermal ısıtma ise 70 ülkede uygulanmaktadır. Jeotermal enerji dünyanın diğer ısı kaynaklarıyla karşılaştırıldığında, ısı salınımı oldukça düşük seviyede olup, sürdürülebilir enerji olarak kabul görmektedir. Jeotermal santraller, ortalama 1 MWh'e 122 kg karbondioksit salınımıyla kömür santrallerine göre çok daha düşük (8'de 1 oranında) bir salınımına sebep olmaktadır (Kılıç ve Kılıç, 2013).

Jeotermal enerji santralleri, termal santrallerdeki buhar türbinlerine benzer. Bunlar da akışkan çevrime girmektedir; jeotermal enerji santrallerinde, daha önce belirtildiği gibi dünya çekirdeğinin ısısı kullanılır; termal enerji santrallerinde ise çeşitli yakıtlar kullanılmaktadır. Jeotermal elektrik santrallerinin sınıflandırılması (Kılıç ve Kılıç, 2013):

1) Kuru buhar santralleri: Kuru buhar santralleri jeotermal elektrik santrallerinin en basit olanıdır. Bu santrallerde 1500 °C'deki jeotermal buhar, doğrudan türbinleri çevirmek için kullanılmaktadır.

2) Çürük buhar santralleri: Çürük buhar santrallerinde, çok derinlerden yüksek basınçlı sıcak su, düşük basınçlı tanklara çekilir. Burada elde edilen buhar da enerji türbinlerini çevirmek için kullanılır. Çürük buhar santralleri için minimum 1800 °C veya daha yüksek miktarda sıcaklık gerekir. Yaygın olarak kullanılan bir santral çeşididir.

3) İki elemanlı çevrim santralleri: İki elemanlı çevrim santralleri, son zamanlarda gelişen bir santral tipidir. Ortalama 570 °C'ye kadar olan düşük sıcaklıklarda çalışabilir. Bu santrallerde, yumuşak sıcak jeotermal su, kaynama sıcaklığı daha düşük bir akışkanın yanından geçirilmektedir. Bu da türbinleri döndüren ikinci akışkanın buharlaşmasını sağlamaktadır.

Bugünkü jeotermal elektrik santrallerinin çoğunluğunda bu teknoloji kullanılır. Termal verimliliği % 10 civarındadır (Çentez, 2013).

3. JEOTERMAL GÜÇ SİSTEMİNİN TERMODİNAMİK PERFORMANSI

Bu tez çalışmasında jeotermal bir güç sisteminin termodinamik performansını araştırmak istendiğinden, Bereket Jeotermal Enerji Üretim A.Ş.'ye ait Bereket Jeotermal Güç Sistemi seçilmiştir. Sistem üzerinden toplanan gerçek işletme verilerine dayanarak geleneksel ve ileri ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler doğrultusunda sistemin performansının ne olduğu, performansı etkileyen faktörler ve sistem üzerinde nerede ve nasıl iyileştirmeler yapılabileceği hakkında bilgiler toplanmıştır. Bu bilgiler doğrultusunda bazı sonuç ve önerilerde bulunulmuştur.

3.1. Jeotermal Güç Sisteminin Tanımlanması

Kızıldere jeotermal alanından beslenen Bereket Jeotermal Güç Santrali, Bereket Jeotermal Enerji Üretim A.Ş. tarafından 2007 yılı sonunda kurulmuştur. Kızıldere Jeotermal Alanı Denizli ilinin 40 km batısında Büyük Menderes nehrinin yanında yer almaktadır. Jeotermal alan Türkiye'nin enerji üretimini arttırmak amacıyla keşfedilen ilk alan ve aynı zamanda Türkiye'de bilinen en yüksek sıcaklıklı jeotermal alanıdır. Alanda yaklaşık 300-800 m derinliğinde ve 195-212 °C sıcaklıkta jeotermal su çıkarılmaktadır (Şimsek, 1985).

Bereket Jeotermal Güç Sistemi su soğutmalı ve yan yana iki tane ikili (binary) enerji santralinden oluşmakta ve 6,35 MW_e net elektrik üretim kapasitesine sahiptir. Bereket Jeotermal Güç Sisteminin resmi Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Sistemde Zorlu Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretim A.Ş.'den alınan jeotermal su kullanılır ve bu jeotermal su 2 km uzunluktaki boru hattı ile taşınır (Şekil 3.1). Kızıldere jeotermal alanında henüz kapsamlı bir re-enjeksiyon stratejisi görülmemektedir (Serpen vd., 2009).



Şekil 3.1. Bereket jeotermal güç sisteminden bir görünüş (GEKA, 2011).

Bereket jeotermal güç sistemi, flaş santralden 145 °C'de ayrılan jeotermal su kullanarak çalışmak üzere tasarlanmıştır. İkili sistemin çıkışında jeotermal su sıcaklığı 75 °C dolaylarındadır. Güç sistemi, Kızıldere jeotermal güç sisteminden aldığı jeotermal su ile ikili çevrimi başlatmaktadır. Alınan su buharlaştırıcıya basılarak pentan ısıtılır, sonra düşük basınçlı birinci kısımdan ikinci kısma geçerek çevrime devam eder ve ön ısıtıcılardan geçirilir. Ama ön ısıtıcılar belirli bir sıcaklığın üstünde devreden çıkarılmaktadır. Isınan pentan türbinlere gönderilerek türbin döndürülür ve sonra yoğuşturucuya gönderilir. Orada soğutucu su sayesinde soğutulmuş ön ısıtıcıya gönderilir. Ön ısıtıcıdan çıkan pentan tekrar buharlaştırıcıya gönderilir. Böylece çevrim bu tekrardan başlamaktadır. Sistemde verimi arttırmak için bir başka ikili sistem (düşük basınçlı) ile birlikte ortak çalıştırılır. Sonuçta türbinlerin dönmesi ile üretilen güç de jeneratörde toplanır (Şekil 3.2).

Bereket Jeotermal Enerji Üretim A.Ş. başlangıçta ikili sistemine entegre bir şekilde ikili sistemden çıkan atık jeotermal suyu Sarayköy ilçesindeki Sarayköy Jeotermal Bölge Isıtma Sistemi (8 km uzaklıkta) ile birlikte çalıştırmayı planlamıştır. Sarayköy

gösterilmiştir. Bereket Jeotermal Güç Sistemi için Zorlu Jeotermal Enerji Elektrik Üretim A.Ş.'den yaklaşık 5 bar basınç, 145 °C sıcaklık ve 700 ton/h jeotermal su alınmaktadır. Ancak jeotermal suyun yaklaşık 3,2 bar basınç ve 125 °C sıcaklık ve 300 ton/h'i Sarayköy Jeotermal Bölgesel Isıtma Sisteminde kullanılırken çalışma verilerinin alındığı tarihte kalan jeotermal akışkan 400 ton/h'i Bereket Jeotermal Güç Sisteminde kullanılmıştır. Güç sisteminde jeotermal su yaklaşık 70-75 °C'ye kadar soğutulmaktadır. Sonra 700 ton/h'lik jeotermal suyun tamamı doğaya serbest (Büyük Menderes Nehri) bırakılmaktadır. Bu tez çalışmasındaki analiz için sistemin sıcaklık, basınç ve debi ile ilgili gerçek işletimsel veriler Bereket Jeotermal Güç Sistemi'ndeki Denetleme Kontrol Sistemi (SCADA) programı tarafından 14 Nisan 2013 tarihinde kaydedilmiştir. Geleneksel ve ileri ekserji analizleri için bu gerçek sistem verileri kullanılmıştır.

3.2. Analiz

Mühendislik sistemlerinin birçoğu, aynı giriş ve çıkış koşullarında uzun süreler çalışırlar. Örneğin bir güç santralinin türbin, kompresör, ısı değiştiricisi, pompa gibi elemanları, sistem bakıma alınmadan önce aylarca çalışabilir. Bu nedenle bu sistemler, sürekli akışlı açık sistemler olarak çözümlenmektedir (Çengel vd., 1999).

Sürekli akışlı açık sistemde, kontrol hacminin kütlesi ve toplam enerjisi sabittir. Sürekli akışlı açık sistemler için kütle ve enerjinin korunumu denklemleri, Denklemler (3.1) ve (3.2)'de gösterilmektedir.

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_g \quad (3.1)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\phi \theta_\phi - \sum \dot{m}_g \theta_g \quad (3.2)$$

Burada g girişi ϕ çıkışı göstermekte olup \dot{Q} ve \dot{W} net ısı ve iş girdisi, \dot{m} kütleli debi, $\dot{m}\theta$ terimi kontrol hacmine birim zamanda kütleyle aktarılan enerjiyi ifade eder.

Ekserji, enerjinin işe çevrilebilme potansiyeli olarak tanımlanmaktadır. Bu potansiyel, enerjinin bulunduğu duruma (sıcaklık, basınç gibi) ve çevre şartlarına

bağlı olarak hesaplanmakta ve elde edilebilecek maksimum işi ifade etmektedir. Bir hal değişimi sırasında kaybedilen iş potansiyeli tersinmezlik veya ekserji kaybı olarak tanımlanmaktadır. Bir hal değişimi sırasında ekserji kayıpları ne kadar az ise üretilen iş o kadar fazladır veya tüketilen iş o kadar azdır. Bir sistemin performansı ekserji kayıplarının en aza indirgenmesi yoluyla maksimize edilmektedir (Kanoğlu, 2007).

Ekserji analizi hem bir işlemi (tersinmezlikler nedeniyle) sürdürmek için kullanılan ekserji tüketimini hem de ekserji kayıpların (çevreye ekserji taşınması) tanımlanması ve miktarının belirlenmesi ile ilgilidir. Bunlar gerçek yetersizliklerdir ve bu sayede bir sistemin iyileştirme alanlarını aydınlatılabilir. Yıllar boyunca, böyle bir analiz kapsamlı olarak ele alınmıştır ve geniş bir yelpazede termal sistemlere uygulanmıştır.

3.2.1. Geleneksel ekserji analizi

Termodinamiğin İkinci Yasası hal değişimlerinin herhangi bir yönde değil, fakat belirli bir yönde gerçekleşebileceğini belirtmektedir. Termodinamiğin İkinci Yasasının kullanımı sadece hal değişimleri yönünü belirlemekle sınırlı değildir. İkinci Yasa enerjinin niceliği yanında niteliğini de ön plana çıkarmaktadır. Bir hal değişimi sırasında enerjinin niteliğinin azalması, entropi üretimi, iş yapma olanağının değerlendirilememesi bu yasanın inceleme alanı içindedir. Termodinamiğin Birinci ve İkinci Yasalarını sağlamayan bir hal değişimi gerçekleşemez (Çengel vd., 1999). Termodinamiğin İkinci Yasası, entropi adlı yeni bir özelliğin tanımlanmasına yol açmıştır. Entropi bir sistemin mikroskobik düzeyde düzensizliğinin nicel bir ölçüsüdür. Sürekli akışlı açık sistemin entropi değişimi, Denklem (3.3)'te verilmiştir.

$$\Delta S_{\text{net}} = \dot{S}_U = \sum \dot{m}_c s_c - \sum \dot{m}_g s_g + \sum \dot{Q}_R / T_R \geq 0 \quad (3.3)$$

Burada ΔS_{net} sistemin toplam entropi değişimini, s özgül entropiyi, \dot{Q}_R ısı enerji deposuyla birim zamanda olan ısı alışverişini, T_R ısı enerji deposunun sıcaklığını vermektedir.

Sonlu miktarda ısı enerjiyi sıcaklığı değişmeden alabilen veya verebilen cisimlere

ısı enerji deposu adı verilir. Çevreyle ısı alışverişinde bulunan, bir girişli ve bir çıkışlı, sürekli akışlı açık sistem için yukarıdaki bağıntı, Denklem (3.4)'deki duruma gelir.

$$\Delta S_{\text{net}} = \dot{S}_U = \sum \dot{m}_\phi s_\phi - \sum \dot{m}_g s_g + \sum \dot{Q}_\phi / T_\phi \geq 0 \quad (3.4)$$

Burada $\dot{Q}_\phi = -\dot{Q}$ ve $T_\phi = T_0$ olarak denklem tekrar düzenlenirse

$$\Delta S_{\text{net}} = \dot{S}_U = \sum \dot{m}_\phi s_\phi - \sum \dot{m}_g s_g - \dot{Q}/T_0 \geq 0 \quad (3.5)$$

Yukarıdaki açıklamalardan bir sistemin entropisinin değişmesine neden olabilecek üç etken olduğu açıkça görülmektedir. Bunlar ısı geçişi, kütle akışı ve tersinmezliklerdir. Eğer bir hal değişimi sırasında ısı geçişi olmuyorsa (adyabatik) veya sistem sınırları içerisinde tersinmezlikler yoksa (içten tersinir), kütle değişmediği sürece entropi sabit kalır. Bu tür bir hal değişimi içten tersinir adyabatik veya izantropik hal değişimi diye adlandırılmaktadır. İzantropik hal değişimi gerçek hal değişimleri için bir model oluşturmaktadır.

Tersinir iş, belirli iki hal arasındaki hal değişimi sırasında bir sistemden elde edilebilecek en çok yararlı iş diye tanımlanmakta ve \dot{W}_{tr} ile gösterilmektedir. Tersinir iş \dot{W}_{tr} ile gerçek iş \dot{W} arasındaki fark, hal değişimi sırasında tersinmezliklerden kaynaklanmakta ve \dot{I} ile gösterilen bu fark birim zaman için aşağıdaki bağıntıyla ifade edilmektedir.

$$\dot{I} = \dot{W}_{\text{tr}} - \dot{W} = T_0 \dot{S}_U \quad (3.6)$$

Ekserji, enerjinin işe çevrilebilme potansiyeli olarak tanımlanmaktadır. Bu potansiyel, enerjinin bulunduğu duruma (sıcaklık, basınç, buhar oranı gibi) ve çevre şartlarına bağlı olarak hesaplanmakta ve elde edilebilecek maksimum işi ifade etmektedir. Bir hal değişimi sırasında kaybedilen iş potansiyeli tersinmezlik veya ekserji kaybı olarak tanımlanmaktadır. Bir hal değişimi sırasında ekserji kayıpları ne kadar az ise üretilen iş o kadar fazladır veya tüketilen iş o kadar azdır. Bir sistemin performansı ekserji kayıplarının en aza indirgenmesi yoluyla maksimize edilmektedir (Kanoğlu, 2007).

Ekserji analizi, İkinci Yasaya dayanan bir termodinamik analiz olup enerji sistemlerini ve hal değişimlerini gerçekçi ve anlamlı biçimde değerlendirmeyi ve karşılaştırmayı mümkün kılmaktadır. Ekserji analizi ile bulunan ekserji veya ikinci yasa verimleri gerçek sistem performansını maksimum performansla karşılaştırırken, ekserji analizi yardımıyla termodinamik kayıpların yerleri, miktarları ve nedenleri bulunmaktadır. Ekserji analizi sonuçları, sistemin performansının iyileştirilmesinde ve daha iyi tasarımların yapılmasında kullanılmaktadır (Kanoğlu, 2007). Bir akışın kullanılabilirliği, özgül ekserji diye adlandırılmakta ve e ile gösterilmektedir. Giriş hali indissiz olarak, çıkış hali de ölü hal olmak üzere 0 indisiyle gösterilirse

$$e = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + V^2/2 + gz \quad (3.7)$$

olarak belirtilmektedir. Bu bağıntıdan yararlanarak toplam ekserji ise, Denklem (3.8)'de özgül ekserjiyle kütleli debinin çarpımıyla bulunmaktadır.

$$\dot{E} = \dot{m} e \quad (3.8)$$

Bir giriş ve bir çıkışlı sürekli akışlı açık sistem için ekserji miktarının hesaplanması mümkündür. Kaybedilen toplam ekserji bir ekserji dengesi yardımıyla bulunabilmektedir. Termodinamiğin Birinci Kanunu (Denklem (3.2)) ve Termodinamiğin İkinci Kanunu (Denklem (3.4)) ile birlikte kullanılarak kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilirse ve kontrol hacmine giren ve çıkan ekserji değerleri aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$\dot{E}_H - \dot{W} = \sum \dot{E}_c - \sum \dot{E}_g + \dot{E}_Y \quad (3.9)$$

Burada Y alt indisi ekserji yıkımını göstermekte olup ısı, \dot{E}_H , Denklem (3.10)'daki ifade de T sıcaklığındaki bir ısı kaynağından elde edilen net ekserji transferini belirtmektedir.

$$\dot{E}_H = \sum (1 - T_0/T) \dot{Q} \quad (3.10)$$

Kontrol hacmindeki ekserji kayıpları veya tersinmezlikler sisteme giren ve çıkan ekserji miktarlarının farkı ile belirlenmektedir.

$$\Delta \dot{E} = \sum \dot{I} = \dot{E}_g - \dot{E}_\varphi = \sum \dot{m}_g e_g - \sum \dot{m}_\varphi e_\varphi \quad (3.11)$$

Ekserji analizi bir enerji dönüşüm sisteminde yer ve verimsizlik ve kayıpların yerlerini ve nedenleri gösterir ve enerji analizi ile bulunamayan faktörlere fikir verir. Bir sistem için ekserji analizi denge bileşen seviyesinde ifade edilen denge denklemlerin bir sistemden ve bütün bir sistem için genel bir denklemden oluşur.

Böylece genel bir sistem için geleneksel ekserji dengesi olarak ifade edilir (Tsatsaronis, 1999):

$$\dot{E}_{YA,top} = \dot{E}_{U,top} + \sum_k \dot{E}_{Y,k} + \dot{E}_{K,top} \quad (3.12)$$

Burada \dot{E}_U , \dot{E}_{YA} , \dot{E}_Y ve \dot{E}_K ise sırasıyla ürün (ekserjetik ürün), yakıt (ekserjetik yakıt), ekserji yıkımı ve genel sistem ekserji kaybı ile ilişkili ekserji oranlarıdır. Sistem sınırları, T_0 referans halde olduğu varsayılmaktadır. Yani k 'nıncı bileşen ile ilişkili ekserji kayıpları yoktur (Tsatsaronis, 1999). Bunun bir sonucu olarak ekserji kaybı aslında yalnızca genel sistem seviyesinde görünür. Bileşen boyunca kütleli debi ve spesifik entropi üretimi ($s_{U,k}$) dayanarak ekserji yıkımı oranı ile birlikte k th bileşenin ekserjetik dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{E}_{Y,k} = \dot{E}_{YA,top} - \dot{E}_{U,top} = T_0 \dot{S}_{U,k} = T_0 \dot{m}_k s_{U,k} \quad (3.13)$$

Geleneksel ekserji analizini değerlendirmek için ekserji verim aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{E}_{U,k}}{\dot{E}_{YA,k}} = 1 - \frac{\dot{E}_{Y,k}}{\dot{E}_{YA,k}} \quad (3.14)$$

3.2.2. İleri ekserji analizi

Tüm gerçek işlemler; kimyasal reaksiyon, sonlu sıcaklık farkında ısı transferi, farklı kompozisyonlar ya da hallerde madde karışımı, sınırsız genişleme ve sürtünme gibi etkiler nedeniyle tersinmez olaylardır (Petrapoulou, 2011). Bir ekserji analizi en

yüksek ekserji yıkımı olan sistem bileşenlerini ve bunlara neden olan işlemleri tanımlar. Geleneksel ekserji analizi ile tersinmezliklerin yerleri, büyüklükleri ve nedenleri tanımlanmaktadır. Böylece iyileştirme için genel bir yön gösterilir. Ancak geleneksel analiz sistem bileşenleri arasındaki etkileşimleri açıklayamamakta veya iyileştirmenin gerçek potansiyelini tahmin edememektedir. Bileşen etkileşimlerini dikkate almadan, özellikle çok sayıda karşılıklı etkileşen bileşenlere sahip karmaşık sistemler düşünüldüğünde bu sistem optimizasyon stratejileri yanlış olabilir. Bu eksikliği gidermek için gelişmiş ekserji analizi ele alınmaktadır.

Bir sistemin ekserji yıkımının bir kısmından yapısal değişiklikler veya bileşenlerin tek tek verimliliği iyileştirmeler yapılarak önlenebilir. Teknik bir tasarım ve/veya işletimsel iyileştirme ile önlenemeyen ekserji yıkımına önlenemeyen (ON) olarak kabul edilir. ON miktarı hem iyileştirme adımlarının belirlenmesinde hem de bir sistemin iyileştirme potansiyelini tahmininde ana rol oynamaktadır. Önlenemeyen fiziksel, teknolojik ve ekonomik kısıtlamalar ile ilişkili kalan ekserji yıkımına kaçınılmaz (KA) olarak kabul edilir. Böylece ekserji yıkımı önlenemeyen/kaçınılmaz kısımlara aşağıdaki ifadedeki gibi ayrıştırılabilir (Tsatsaronis ve Park, 2002; Czieśla vd., 2006; Tsatsaronis ve Morosuk, 2008a; 2008b; Petrakopoulou vd., 2012):

$$\dot{E}_{Y,k} = \dot{E}_{Y,k}^{KA} + \dot{E}_{Y,k}^{ON} \quad (3.15)$$

Ayrıca, aşağıda Denklem (3.16)'da görüldüğü gibi ekserji yıkımı kendi kaynağına bağlı olarak da ayrıştırılabilir: Bileşenler arasındaki etkileşimler sonucunda gerçekleşene dışsal (DIS), bileşenin kendi çalışmasından kaynaklanana ise içsel (IC) olarak tanımlanır (Tsatsaronis vd., 2006; Morosuk ve Tsatsaronis, 2008b; Kelly vd., 2009).

$$\dot{E}_{Y,k} = \dot{E}_{Y,k}^{IC} + \dot{E}_{Y,k}^{DIS} \quad (3.16)$$

İçsel ve dışsal miktarlar kullanarak bileşenler arasındaki etkileşimler ve iyileştirme alternatifleri tanımlanabilir.

3.2.2.1. Ekserji yıkım miktarını ayırıştırma

Bir bileşen içindeki ekserji yıkımının bileşenin kendisinden mi ($\dot{E}_{Y,k}^{IC}$) ya da diğer sistem bileşenlerinin çalışmasından mı ($\dot{E}_{Y,k}^{DIS}$) kaynaklandığını ayırt etmek için, sistemin çalışma şartları düzeltilmesi gereklidir. İçsel ekserji yıkımını hesaplamak için sistemin diğer tüm bileşenleri teorik şartlarda (tersinmezlikler olmadan) çalıştırılırken hesap edilen k 'nıncı bileşen gerçek şartlar altında çalıştırılması gerekir. Her durumda tüm sistemin güç çıkışı gerçek duruma sabit ve eşit tutulmalıdır. Böylece dışsal ekserji yıkımı ($\dot{E}_{Y,k}^{DIS}$), k 'nıncı bileşendeki toplam ekserji yıkımının kalan kısmıdır (Petrakopoulou, 2011).

Dışsal ekserji yıkımı ($\dot{E}_{Y,k}^{DIS}$), gerçek ekserji yıkımında içsel ekserji yıkımı miktarının çıkarılmasıyla hesaplanır:

$$\dot{E}_{Y,k}^{DIS} = \dot{E}_{Y,k}^{Gercek} - \dot{E}_{Y,k}^{IC} \quad (3.17)$$

Teknolojik ve ekonomik sınırlamalar ekserji yıkımının minimum değerini belirler. Ekserji yıkımı kaçınılmaz kısmı ($\dot{E}_{Y,k}^{KA}$) sistemden ayrılmış tek başına her bir bileşen dikkate alınarak hesaplanmıştır. Ürün ekserjisi başına birim ekserji yıkım oranı (\dot{E}_Y / \dot{E}_U)^{KA} sistem bileşenin yüksek verim ve düşük kayıplarla çalıştığı varsayılarak hesaplanır. k 'nıncı bileşen için gerçek durumdaki ürün ekserjisi ($\dot{E}_{U,k}^{Gercek}$) miktarıyla kaçınılmaz ekserji yıkımı gibi hesaplanır (Petrakopoulou, 2011):

$$\dot{E}_{Y,k}^{KA} = \dot{E}_{U,k}^{Gercek} \left(\frac{\dot{E}_Y}{\dot{E}_U} \right)_k^{KA} \quad (3.18)$$

k 'nıncı bileşendeki ekserji yıkımının kaçınılmaz kısmı bilindiği takdirde önlenebilir kısımda Denklem (3.19) ile elde edilir (Petrakopoulou, 2011).

$$\dot{E}_{Y,k}^{ON} = \dot{E}_{Y,k}^{Gercek} - \dot{E}_{Y,k}^{KA} \quad (3.19)$$

Enerji tüketen bileşenler için ürün ekserji miktarı tanımlanmaz ise önlenebilir ve

kaçınılmaz ekserji yıkımları arasında bir ayırım yapılamaz.

3.2.2.2. İçsel ve dışsal kısımlar içerisindeki ekserji yıkımının önlenebilir ve kaçınılmaz kısımlara ayrıştırılması

k 'inci bileşen içerisindeki kaçınılmaz içsel ve dışsal ekserji yıkım miktarları ($\dot{E}_{Y,k}^{KA,IC}$ ve $\dot{E}_{Y,k}^{KA,DIS}$) aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir (Tsatsaronis ve Morosuk, 2007; 2008a; 2008b):

$$\dot{E}_{Y,k}^{KA,IC} = \dot{E}_{U,k}^{IC} \left(\frac{\dot{E}_Y}{\dot{E}_U} \right)_k^{KA} \quad (3.20)$$

$$\dot{E}_{Y,k}^{KA,DIS} = \dot{E}_{Y,k}^{KA} - \dot{E}_{Y,k}^{KA,IC} \quad (3.21)$$

Önlenebilir içsel ve dışsal ekserji yıkım miktarları ($\dot{E}_{Y,k}^{ON,IC}$ ve $\dot{E}_{Y,k}^{ON,DIS}$) toplam içsel ve dışsal ekserji yıkım miktarlarında karşılık gelen kaçınılmaz kısımların çıkartılması ile hesaplanır (Tsatsaronis ve Morosuk, 2007; 2008a; 2008b). Bunlar sırasıyla şöyledir:

$$\dot{E}_{Y,k}^{ON,IC} = \dot{E}_{Y,k}^{IC} - \dot{E}_{Y,k}^{KA,IC} \quad (3.22)$$

$$\dot{E}_{Y,k}^{ON,DIS} = \dot{E}_{Y,k}^{DIS} - \dot{E}_{Y,k}^{KA,DIS} \quad (3.23)$$

Daha önce de belirtildiği gibi, ekserji yıkımını ayrıştırma teorisi bir ekserji analizinden elde edilen ekserji yıkım değerlerini daha iyi anlaşılmasını sağlar ve dolayısıyla analiz doğruluğunu artırır. Böylece termal sistemlerin iyileştirilmesini kolaylaştırılır.

İleri ekserji analizini değerlendirmek için modifiye ekserji verimi aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\varepsilon_{\text{modifiye}} = \frac{\dot{E}_{U,k}}{\dot{E}_{YA,k} - \dot{E}_{Y,k}^{KA} - \dot{E}_{Y,k}^{ON,DIS}} \times 100 \quad (3.24)$$

3.3. Jeotermal Güç Üretim Sistemine Ekserji Analizlerinin Uygulanması

Bereket jeotermal güç sistemi su soğutmalı ve yan yana iki tane ikili enerji santralinden oluşmakta ve 6,35 MW_e net elektrik üretim kapasitesine sahiptir. Jeotermal su yüksek basınçlı bölümden 145°C, 4,2 bar ve 400 ton/h ile santrale girmekte sıvı haldeki jeotermal suyun tamamı doğaya serbest bırakılmaktadır. Organik akışkan su soğutması ile kondenserlerde soğutulmaktadır. Santralde çevrim içinde organik akışkan olarak normal pentan kullanılmaktadır. Ekserji hesaplamasında kolaylık sağlamak amacı ile Şekil 3.2’de görüldüğü üzere akışkanın ilerlediği yol numaralandırılmıştır. Bu yollarda Bereket jeotermal güç sisteminden alınan basınç, sıcaklık ve debi değerleri 14 Nisan 2013 tarihinde Denetleme Kontrol Sistemi (SCADA) programından alınmıştır. Burada bütün akışkanların özellikleri basınç ve sıcaklığına bağlı olarak ve gerekli hesaplamalar yapılarak bulunmuştur. Hesaplamalar için EK A’daki ekserji yıkımı ve ekserji verimi ifadeleri kullanılmıştır. Gerçek işletme şartlarında Çizelge 3.1’de akışkanların ilerlediği durumlardaki sıcaklık, basınç ve kütleleri verilmektedir. Bu çizelgelerde sıcaklık, basınç, entalpi, entropi ve akışkanların kütleleri girilerek ekserji miktarları hesaplanmıştır. Jeotermal akışkan ve n-pentan 0 durumları için ölü hal koşullarında, diğer bir deyişle 0.1 MPa atmosfer basıncı ve 16 °C’deki entalpi ve entropi değerleridir. Jeotermal akışkan için suyun termodinamik özellikleri kullanılmıştır. Böylelikle jeotermal akışkan içindeki tuz ve yoğunlaşmayan gazların etkileri ihmal edilmiştir.

Çizelgede jeotermal akışkan sıvı halde 145 °C, 111,1 kg/s ile santrale girmekte ve 67 °C, 111,1 kg/s ile doğaya serbest bırakılmaktadır. Birinci bölümdeki BUH 1 buharlaştırıcısına 145 °C ve 111,1 kg/s kütleyle giren jeotermal su buradan aynı kütle ve sıcaklığı 105 °C ile ayrılmakta ve BUH 2 buharlaştırıcısına girmektedir. Daha sonra BUH 2 buharlaştırıcısından 79 °C ile ayrılan jeotermal su eşit miktarda ikiye ayrılarak yine aynı sıcaklıkta ve 55,56 kg/s kütleli debide ön ısıtıcılar ON-ISI 1 ve ON-ISI 2’ye girmektedir. Ön ısıtıcılardan 67 °C’de ayrılmaktadır.

Çizelge 3.1. Bereket jeotermal güç sisteminin gerçek işletme şartlarında her bir durumu için termodinamik özellikleri ve ekserji miktarı.

No, j	Akışkan tipi	Sıcaklık T _j (°C)	Basınç P _j (kPa)	Entalpi h _j (kJ/kg K)	Entropi s _j (kJ/kg K)	Debi m _j (kg/s)	Ekserji Ė _j (kW)
0	Jeotermal akışkan	16	101,325	67,2	0,2387	-	-
0	n-pentan	16	101,325	-22,74	-0,075	-	-
1	Jeotermal akışkan	145	420	610,8	1,791	111,1	10524
2	Jeotermal akışkan	145	420	610,8	1,791	111,1	10524
3	Jeotermal akışkan	105	320	440,3	1,363	111,1	5341
4	Jeotermal akışkan	79	260	330,9	1,063	111,1	2809
5	Jeotermal akışkan	79	260	330,9	1,063	55,56	1405
6	Jeotermal akışkan	79	260	330,9	1,063	55,56	1405
7	Jeotermal akışkan	67	170	280,6	0,9181	55,56	940,3
8	Jeotermal akışkan	67	170	280,6	0,9181	55,56	940,3
9	Jeotermal akışkan	67	101,325	280,5	0,9181	111,1	1873
10	n-pentan	29	1000	7,973	0,0237	130	272,6
11	n-pentan	40	900	33,81	0,1082	130	454,3
12	n-pentan	117	900	234,6	0,6796	130	5081
13	n-pentan	80	400	133,2	0,4092	130	2060
14	n-pentan	29	108	7,224	0,0261	130	86,77
15	n-pentan	29	500	7,552	0,0250	150	194,4
16	n-pentan	40	500	33,5	0,1094	150	428,3
17	n-pentan	69	450	104,9	0,3275	150	1673
18	n-pentan	55	250	69,69	0,2235	150	904,1
19	n-pentan	29	108	7,224	0,2606	150	100,1
20	Soğutma suyu	16	101,325	67,2	0,2387	416,67	0
21	Soğutma suyu	16	101,325	67,2	0,2387	416,67	0
22	Soğutma suyu	23	101,325	96,48	0,3388	416,67	145,3
23	Soğutma suyu	23	101,325	96,48	0,3388	416,67	145,3
24	Soğutma suyu	23	101,325	96,48	0,3388	833,33	290,7
25	Soğutma suyu	23	101,325	96,48	0,3388	277,78	96,89
26	Soğutma suyu	23	101,325	96,48	0,3388	277,78	96,89
27	Soğutma suyu	23	101,325	96,48	0,3388	277,78	96,89
28	Soğutma suyu	23,3	250	97,87	0,343	277,78	146,6
29	Soğutma suyu	23,3	250	97,87	0,343	277,78	146,6
30	Soğutma suyu	23,3	250	97,87	0,343	277,78	146,6

Birinci bölümdeki ikili çevrimde 130 kg/s kütle ile n-pentan çevrim içinde döndürülmektedir. Organik akışkan 10 bar basınç ve 29 °C sıcaklıkta ön ısıtıcıya girmekte ve buradan 9 bar ve 40 °C sıcaklıkla ayrılmaktadır. Daha sonra bu sıcaklıkla BUH 1 buharlaştırıcısına girerek buharlaşma sıcaklığı olan 117 °C'ye kadar ısıtılmaktadır. Organik akışkan 9 bar basınç ve 117 °C sıcaklıkla türbine girerken, 4 bar basınç ve 80 °C sıcaklıkla çıkmaktadır. Kondenserde soğutma suyu kullanılarak soğutularak sıcaklığı 29 °C'ye düşürülmektedir. Sistem dış ortam sıcaklığı ortalama 16 °C olarak alınmaktadır.

İkinci bölümdeki ikili çevrimde organik akışkan olan normal pentan daha düşük

basınçlı kapalı bir sistem içinde döndürülmektedir. Normal pentan ÖN-ISI 2'ye 5 bar ve 29 °C sıcaklıkla girmekte buradan 40 °C sıcaklıkla çıkarak buharlaştırıcı BUIH 2'ye girmektedir. 40 °C sıcaklıkla buharlaştırıcıya giren n-pentan 69 °C sıcaklığa kadar ısıtılmaktadır. Daha sonra 4,5 bar basınçla türbine giren akışkan 2,5 bar basınçta ve 55 °C sıcaklığa düşmektedir. Kondenser KON 2'de soğutma suyu kullanılarak akışkan sıcaklığı 29 °C'ye düşürülmektedir.

Kondenserlerde Büyük Menderes Nehrinden alınan 833,34 kg/s'lık soğutma suyu kullanılır. Güç sistemi, nehir kod seviyesi altında olduğu için soğutma suyu kendi ağırlığı ile getirilirken 60 kW'lık 3 pompa (PO 3, PO 4 ve PO 5) ile nehre geri basılmaktadır.

Bu güç sisteminde organik akışkan kullanılmasının nedeni düşük kaynama sıcaklığına sahip olmasıdır. Ayrıca, iyi yönetildiğinde güvenli akışkan olup zehirleyici ve korozif etkileri bulunmamakta böylelikle donanımda yüksek bakım maliyetine neden olmamaktadır.

Birinci ikili çevrimdeki TURB 1 türbinin güç çıkışı 1214 kW_e ve ikinci ikili çevrimdeki TURB 2 türbinin güç çıkışı 369 kW_e'dir. Birinci ve ikinci ikili çevrimlerdeki ve çevrimdeki yoğuşuk pompasının güçleri sırasıyla 250 kW_e ve 150 kW_e'dur. Birinci ve İkinci Rankine Çevrimi net güç çıkışı 3707 kW_e ve 3513 kW_e olmaktadır. Buradan yapılan hesaplar sonucu net güç yaklaşık 1010 kW_e olmaktadır.

Öncelikle geleneksel ekserji analizi yapılmalıdır. Bereket Jeotermal güç sisteminden gerçek işletme şartlarında SCADA programı yoluyla toplanan veriler Çizelge 3.1'de verilmiştir. Çalışmadaki tüm hesaplamalar için Mühendislik Denklem Çözücü (Engineering Equation Solver – EES) kullanılmıştır. Bu veriler kullanılarak geleneksel ekserji analizi her bir referans noktanın ekserji miktarları hesaplanmıştır. Sistem bileşenleri için EK A'da verilen denklemler kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Gerçek çalışma koşulları altında Çizelge 3.2'deki geleneksel analiz sonuçları elde edilmiştir. Çizelgede tüm sistemin ekserji girişi 10,52 MW iken bu enerjinin yaklaşık %21,98'i ısı kaybı olmuş ve %68,42'si ise ekserji yıkımı meydana gelmiştir. Güç sisteminde tüm sistemin ekserji girişinin yaklaşık 1 MW üretilen ekserji olmuştur. Yani tüm sistem %9,60 bir ekserji verimi ile çalışmaktadır.

Çizelge 3.2. Gerçek işletme şartlarında geleneksel ekserji analizinin sonuçları.

Bileşen, k	$\dot{E}_{YA,k}$ (kW)	$\dot{E}_{U,k}$ (kW)	$\dot{E}_{Y,k}$ (kW)	$\dot{E}_{KA,top}$ (kW)	ϵ_k (%)
KON 1	1973	145,3	1828	-	7,36
KON 2	804	145,3	658,7	-	18,07
ON-ISI 1	464,6	181,7	282,9	-	39,11
ON-ISI 2	464,6	233,9	230,7	-	50,34
TURB 1	3022	1214	1808	-	40,17
TURB 2	768,9	369	399,9	-	47,99
BUH 1	5183	4627	555,4	-	89,27
BUH 2	2532	1245	1287	-	49,17
PO 1	250	185,8	64,22	-	74,32
PO 2	150	94,25	55,75	-	62,83
PO 3	60	49,74	10,26	-	82,90
PO 4	60	49,74	10,26	-	82,90
PO 5	60	49,74	10,26	-	82,90
Tüm sistem	10524	1010	7201	2313	9,60

Gerçek çalışma koşulları altında Çizelge 3.2'deki geleneksel analiz sonuçları elde edilmiştir. Çizelgede tüm sisteme 10,52 MW'lık bir ekserji girişi var iken bu ekserjinin yaklaşık %21,98'i ısı kaybı ile ve %68,42'si ise ekserji yıkımı ile meydana gelmiştir. Güç sisteminde tüm sisteme giren ekserjinin yaklaşık 1 MW üretilen ekserji olmuştur. Yani tüm sistem %9,60 bir ekserji verimi ile çalışmaktadır.

İleri ekserji analizi sistem bileşenleri arasındaki etkileşimleri veya yapılabilecek iyileştirmenin gerçek potansiyelini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Ancak geleneksel ekserji analizi yapmadan ileri ekserji analizi yapmak mümkün değildir. İleri ekserji analizi için sistem sınırları, T_0 referans halde olduğu varsayılmaktadır. Yani bir bileşen ile ilişkili ekserji kayıpları yoktur (Tsatsaronis, 1999). Bunun bir sonucu olarak ekserji kaybı aslında yalnızca genel bir sistem seviyesinde görünür. Bu nedenle ileri ekserji analizi bileşen seviyesinde yapılan bir analizdir. Genel ekserji denklemi Denklem (3.12), ileri ekserji analizinde Denklem (3.13) şeklini alır. Tüm hesaplamalar bileşen seviyesinde gerçekleşir. İleri ekserji analizi için Çizelge 3.2'deki $\dot{E}_{Y,k}$ ekserji yıkımı sütunu (4. sütun) kullanılır.

İleri ekserji analizi için öncelikle sistemin tüm bileşenleri için kaçınılmaz ve teorik şartlar (Bölüm 3.2.2'ye bkz.) tanımlanmalıdır. Bir sistemin kaçınılmaz şartları her bileşenin mümkün olan en iyi çalışma şartları kabul edilmeli ve kaçınılmaz ekserji yıkımı hesaplanmasında kullanılmaktadır. Öte yandan sistem bileşenleri arasındaki etkileşimi belirlemek için ise sistem bileşenlerini teorik çalışması dikkate alınır.

Böylece dışsal ekserji yıkımı incelenir. Dışsal ekserji yıkımını hesaplamak için tüm diğer bileşenleri teorik olarak çalışırken hesabı yapılan bileşen gerçek koşullar altında çalıştırılır. Tüm bu varsayımlarda sistem güç çıkışı sabit tutulmaktadır.

Sistem bileşenlerinin teorik çalışması ile ilgili varsayımlar sıfır basınç kayıpları, yüksek verimlilik, düşük sıcaklık farklarıdır. Bir bileşen basınç kayıpları olmadan çalıştırıldığında paralel bileşenlerin (gerçek koşullar altında çalıştırılsa bile) basınç kayıpları da sıfır olduğu kabul edilir. Ayrıca bazı bileşenlerin minimum sıcaklık farklılıklarının değişimleri kendi ekserji yıkım miktarını artırarak veya azaltarak paralel bileşenlerinin çalışmasını etkileyebilir. Bu tez çalışmasında ele alınan sistemin tüm bileşenlerinin kaçınılmaz ve teorik işlemi için yapılan varsayımlar Çizelge 3.3'te verilmektedir.

Çizelge 3.3. Teorik işlemleri ve kaçınılmaz ekserji yıkımlarını hesaplamak için yapılan varsayımlar.

Bileşen, k	Kaçınılmaz şartlar	Teorik şartlar
KON 1	$\Delta T_{\min}=3$ $\Delta P=0$	$\Delta T_{\min}=0$ $\Delta P=0$
KON 2	$\Delta T_{\min}=2$ $\Delta P=0$	$\Delta T_{\min}=0$ $\Delta P=0$
ON-ISI 1	$\Delta T_{\min}=3$ $\Delta P=0$	$\Delta T_{\min}=0$ $\Delta P=0$
ON-ISI 2	$\Delta T_{\min}=7$ $\Delta P=0$	$\Delta T_{\min}=0$ $\Delta P=0$
TURB 1	$\eta_{is}=\%93$ $\eta_{mek}=\%100$	$\eta_{is}=\%100$ $\eta_{mek}=\%100$
TURB 2	$\eta_{is}=\%93$ $\eta_{mek}=\%100$	$\eta_{is}=\%100$ $\eta_{mek}=\%100$
BUH 1	$\Delta T_{\min}=1$ $\Delta P=0$	$\Delta T_{\min}=0$ $\Delta P=0$
BUH 2	$\Delta T_{\min}=6$ $\Delta P=0$	$\Delta T_{\min}=0$ $\Delta P=0$
PO 1	$\eta_{is}=\%87$ $\eta_{mek}=\%100$	$\eta_{is}=\%100$ $\eta_{mek}=\%100$
PO 2	$\eta_{is}=\%87$ $\eta_{mek}=\%100$	$\eta_{is}=\%100$ $\eta_{mek}=\%100$
PO 3	$\eta_{is}=\%93$ $\eta_{mek}=\%100$	$\eta_{is}=\%100$ $\eta_{mek}=\%100$
PO 4	$\eta_{is}=\%93$ $\eta_{mek}=\%100$	$\eta_{is}=\%100$ $\eta_{mek}=\%100$
PO 5	$\eta_{is}=\%93$ $\eta_{mek}=\%100$	$\eta_{is}=\%100$ $\eta_{mek}=\%100$
Motorlar	$\eta_{el}=\%98$	$\eta_{el}=\%100$
Jeneratör	$\eta_{el}=\%99,5$	$\eta_{el}=\%100$

Çizelge 3.4. Bereket jeotermal güç sisteminin kaçınılmaz işletme şartlarında her bir durumu için termodinamik özellikleri ve ekserji miktarı.

No, j	Akışkan tipi	Sıcaklık T_j (°C)	Basınç P_j (kPa)	Entalpi h_j (kJ/kg K)	Entropi s_j (kJ/kg K)	Debi \dot{m}_j (kg/s)	Ekserji \dot{E}_j (kW)
0	Jeotermal akışkan	16	101,3	67,2	0,2387	-	-
0	n-pentan	16	101,3	-22,74	-0,075	-	-
1	Jeotermal akışkan	145	420	610,8	1,791	111,1	10524
2	Jeotermal akışkan	145	420	610,8	1,791	111,1	10524
3	Jeotermal akışkan	109	360	457,3	1,407	111,1	5795
4	Jeotermal akışkan	83	300	347,7	1,111	111,1	3156
5	Jeotermal akışkan	83	300	347,7	1,111	55,56	1578
6	Jeotermal akışkan	83	300	347,7	1,111	55,56	1578
7	Jeotermal akışkan	72	150	301,5	0,9792	55,56	1121
8	Jeotermal akışkan	77,6	250	325	1,047	55,56	1347
9	Jeotermal akışkan	74	101,3	309,8	1,003	111,1	2389
10	n-pentan	29,6	880	9,372	0,0283	130	280,5
11	n-pentan	44	880	43,37	0,1387	130	552,8
12	n-pentan	118	950	237,5	0,6867	130	5188
13	n-pentan	83	450	141,1	0,4312	130	2259
14	n-pentan	29	108	7,224	0,0261	130	86,77
15	n-pentan	29,6	500	8,953	0,0297	150	203,6
16	n-pentan	34	250	19,07	0,0642	150	223,8
17	n-pentan	70	500	107,4	0,3347	150	1744
18	n-pentan	59	300	79,62	0,2534	150	1101
19	n-pentan	29	108	7,224	0,0261	150	100,1
20	Soğutma suyu	16	101,3	67,2	0,2387	416,7	0
21	Soğutma suyu	16	101,3	67,2	0,2387	416,7	0
22	Soğutma suyu	29	101,3	121,6	0,4227	416,7	494,6
23	Soğutma suyu	29	101,3	121,6	0,4227	416,7	494,6
24	Soğutma suyu	29	101,3	121,6	0,4227	833,3	989,2
25	Soğutma suyu	29	101,3	121,6	0,4227	277,8	329,7
26	Soğutma suyu	29	101,3	121,6	0,4227	277,8	329,7
27	Soğutma suyu	29	101,3	121,6	0,4227	277,8	329,7
28	Soğutma suyu	29,3	250	123	0,4268	277,8	386,2
29	Soğutma suyu	29,3	250	123	0,4268	277,8	386,2
30	Soğutma suyu	29,3	250	123	0,4268	277,8	386,2

Bereket jeotermal güç sistemi bileşenleri için varsayılan kaçınılmaz ve teorik şartlar kullanılarak Şekil 3.2'deki şematik resim üzerindeki durum hallerinin termodinamik özellikleri sırasıyla Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'te özetlenmiştir. İleri ekserji analizinin tüm sonuçları Ek B'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Bereket jeotermal güç sisteminin teorik işletme şartlarında her bir durumu için termodinamik özellikleri ve ekserji miktarı.

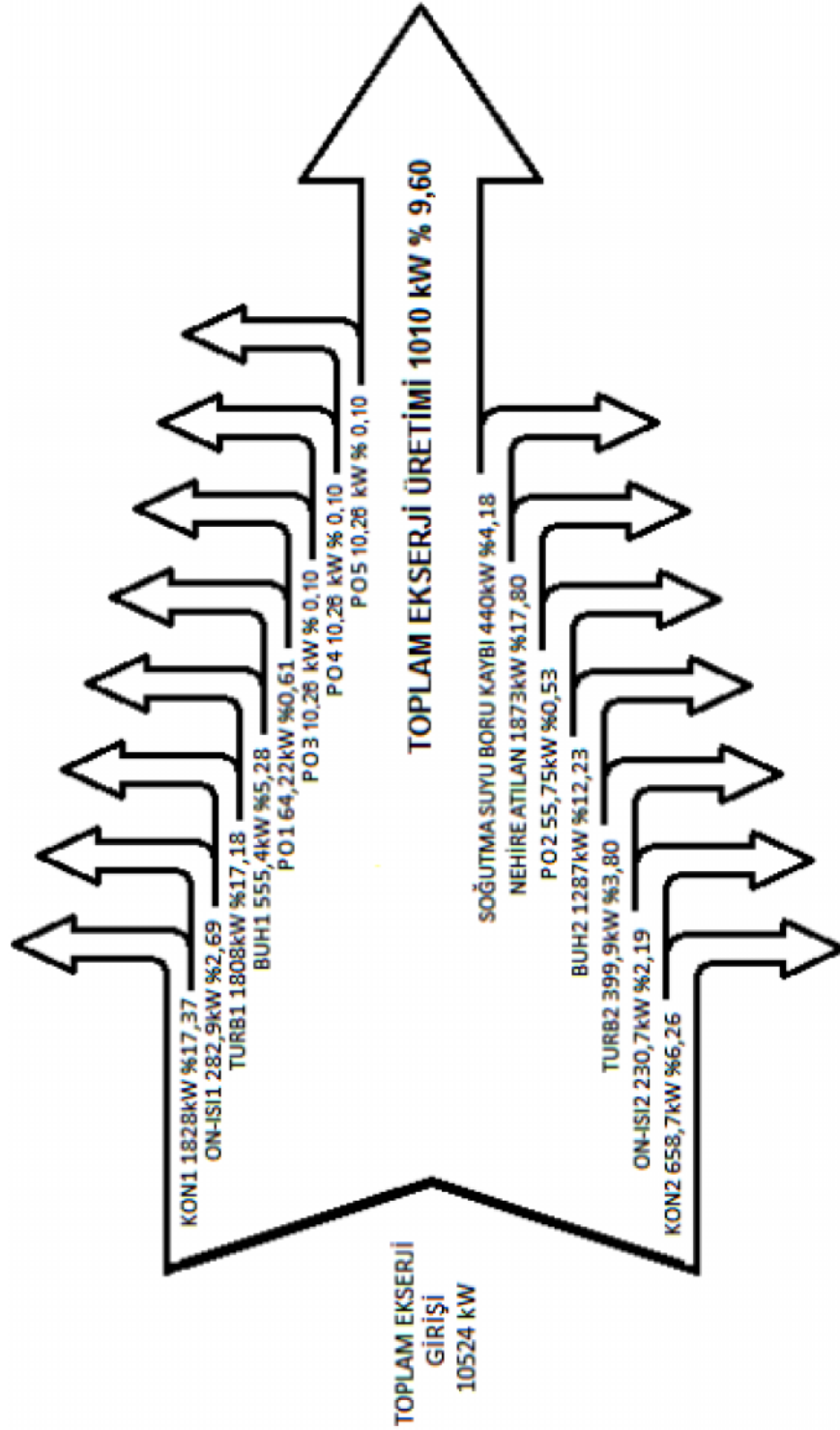
No, j	Akışkan tipi	Sıcaklık T_j (°C)	Basınç P_j (kPa)	Entalpi h_j (kJ/kg K)	Entropi s_j (kJ/kg K)	Debi \dot{m}_j (kg/s)	Ekserji \dot{E}_j (kW)
0	Jeotermal akışkan	16	101,3	67,2	0,2387	-	-
0	n-pentan	16	101,3	-22,74	-0,075	-	-
1	Jeotermal akışkan	145	420	610,8	1,791	111,1	10524
2	Jeotermal akışkan	145	420	610,8	1,791	111,1	10524
3	Jeotermal akışkan	107	340	448,8	1,385	111,1	5566
4	Jeotermal akışkan	81	280	339,3	1,087	111,1	2980
5	Jeotermal akışkan	81	280	339,3	1,087	55,56	1490
6	Jeotermal akışkan	81	280	339,3	1,087	55,56	1490
7	Jeotermal akışkan	69	160	288,9	0,9426	55,56	1011
8	Jeotermal akışkan	72,6	210	304	0,9864	55,56	1147
9	Jeotermal akışkan	71	101,3	297,3	0,9671	111,1	2161
10	n-pentan	29,3	1000	8,673	0,0260	130	276,5
11	n-pentan	42	890	38,58	0,1235	130	501,6
12	n-pentan	117,5	925	236,1	0,6831	130	5135
13	n-pentan	81,5	425	137,1	0,4202	130	2158
14	n-pentan	29	108	7,224	0,0261	130	86,77
15	n-pentan	29,3	500	8,252	0,0273	150	198,9
16	n-pentan	37	375	26,27	0,0868	150	321
17	n-pentan	69,5	475	106,1	0,3311	150	1709
18	n-pentan	57	275	74,64	0,2385	150	1000
19	n-pentan	29	108	7,224	0,0261	150	100,1
20	Soğutma suyu	16	101,3	67,2	0,2387	416,7	0
21	Soğutma suyu	16	101,3	67,2	0,2387	416,7	0
22	Soğutma suyu	26	101,3	109	0,3809	416,7	294,6
23	Soğutma suyu	26	101,3	109	0,3809	416,7	294,6
24	Soğutma suyu	26	101,3	109	0,3809	833,3	589,2
25	Soğutma suyu	26	101,3	109	0,3809	277,8	196,4
26	Soğutma suyu	26	101,3	109	0,3809	277,8	196,4
27	Soğutma suyu	26	101,3	109	0,3809	277,8	196,4
28	Soğutma suyu	26,3	250	110,4	0,3851	277,8	249,6
29	Soğutma suyu	26,3	250	110,4	0,3851	277,8	249,6
30	Soğutma suyu	26,3	250	110,4	0,3851	277,8	249,6

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Günümüzde enerji tüketimi gelişmişliğin ölçütlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Gelişmekte olan ülkeler kategorisinde yer alan Türkiye'deki yaşam biçimi her geçen gün artan enerji tüketimi yönünde gelişme göstermektedir. Tüm dünyada hızlı bir artış gösteren enerji gereksiniminin büyük bir kısmı, bir süre daha fosil yakıtlar ve hidrolik enerji ile karşılanabilecektir. Fakat yenilenebilir enerji kaynaklarının da enerji üretiminde özellikle elektrik üretiminde önemli bir yer almaktadır. Bu tez çalışmasında Bereket Jeotermal Enerji Üretim A.Ş.'ye ait Bereket jeotermal güç sisteminin termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla sisteme ileri ekserji analizi uygulanmış, bileşenler arasındaki etkileşim ve iyileştirme potansiyeli daha iyi anlaşılmıştır.

Öncelikle sistem için geleneksel ekserji analizi yapılmıştır. Bu amaçla 14 Nisan 2013 tarihli gerçek işletme şartları için Denklem (3.8)'deki özgül ekserjiden santralin her durumundaki toplam ekserji ve ekserji kaybı miktarları Mühendislik Denklem Çözücü (Engineering Equation Solver – EES) kullanılarak hesaplanmış ve geleneksel ekserji analiz sonuçları ekserji akış diyagramı olarak Şekil 4.1'de verilmiştir.

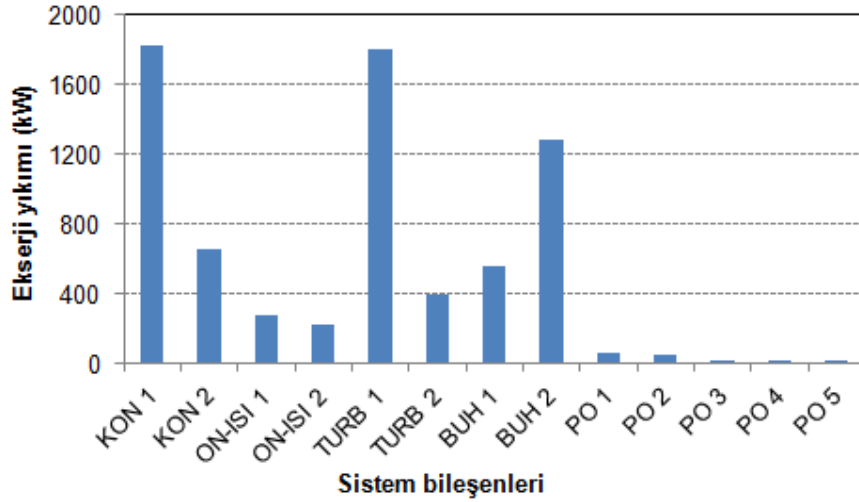
Düşük sıcaklıklı jeotermal kaynakların kullanımında Termodinamiğin İkinci Kanun verimliliği düşük olmaktadır. Şekil 4.1'de verilen akış diyagramından, santralin ekserji verimliliği n-pentan çevrimine ekserji girişine bakılarak %14,95, jeotermal akışkandan santrale giren ekserji girişine dayanarak %9,60 olarak hesaplanmıştır. Bunun sonucunda santrale giren ekserji miktarının %90,4'ü atık ısı olarak kaybolmaktadır. Jeotermal akışkanın ekserjisinin %17,80'ni doğaya serbest bırakılma safhasında, %23,63'ü yoğunlaştırıcılarda, %1,47'si soğutma suyu boru hatlarındaki ısı kaybı ve %12,23'ü ikinci bölümdeki ikili çevrim buharlaştırıcısından atılan buhar ve yoğunmayan gazlarla kaybolmaktadır. Geri kalan %35,27 diğer sistem bileşenlerinin ekserji yıkımlarından meydana gelmektedir.



Şekil. 4.1. Bereket jeotermal güç sisteminin ekserji akış diyagramı.

Sistemdeki ekserji kayıplarının nedenleri, santralin içindeki buharlaştırıcı - ön ısıtıcı kayıpları, türbin - pompa kayıpları, jeotermal akışkan doğaya serbest bırakma - atık ve n-pentan ekserjisinin yoğunlaştırıcudaki ekserji kayıplarını içermektedir. Jeotermal akışkandan sisteme yaklaşık 10540 kW'lık bir ekserji girişi olmuştur. Bu toplam ekserji girişinin 7201 kW'ı sistem bileşenlerinde meydana gelen ekserji yıkımı, 1873 kW doğaya serbest bırakılan ekserji miktarı ve 440 kW'lık kısmı ise soğutma suyu boru hattı ekserji kaybı olarak hesaplanmıştır.

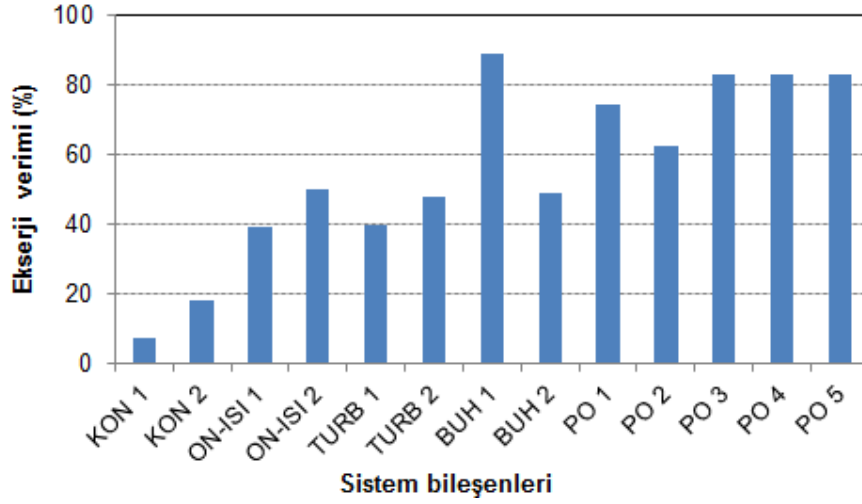
Sistem bileşenlerinin ekserji yıkım miktarları Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Burada tüm sistem bileşenleri için toplam ekserji yıkımı miktarı 7201 kW olarak bulunmuştur. Sistemde en fazla ekserji yıkımı birinci bölümdeki ikili çevrimin KON 1 kondenslerinde meydana gelmiştir. Daha sonra sırasıyla birinci bölümdeki türbin ve ikinci bölümdeki buharlaştırıcıda meydana gelmiştir. Bu şekilden sırasıyla KON 1, TURB 1 ve BUH 2 öncelikli iyileştirilmesi gereken bileşenler olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.2. Bereket jeotermal güç sistemi bileşenlerinin ekserji yıkım miktarının değişimi.

Sistemin bileşenlerinin ekserji verimlerinin değişimi Şekil 4.3'te özetlenmiştir. En yüksek ekserji verimine sahip bileşen %89,27 ile birinci bölümdeki buharlaştırıcı olarak görülmektedir. Sonra ise sistemdeki tüm pompalar gelmektedir. Birinci ve ikinci bölümlerin ikili çevrim için buharlaştırıcıların ekserjetik verimleri sırasıyla

%89,27 ve %49,17 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.3'te birinci ve ikinci bölümün ikili çevrimler için ön ısıtıcıların ekserjetik verimlilikleri sırasıyla %39,11 ve %50,34 olarak bulunmuştur. Şekil 4.3'te verilen her iki bölüm için kondenserlerin verimlerinin düşük olduğu görülmektedir; bu nedenle bu iki bileşenin iyileştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.3. Bereket jeotermal güç sistemi bileşenlerinin ekserji verimlerinin değişimi.

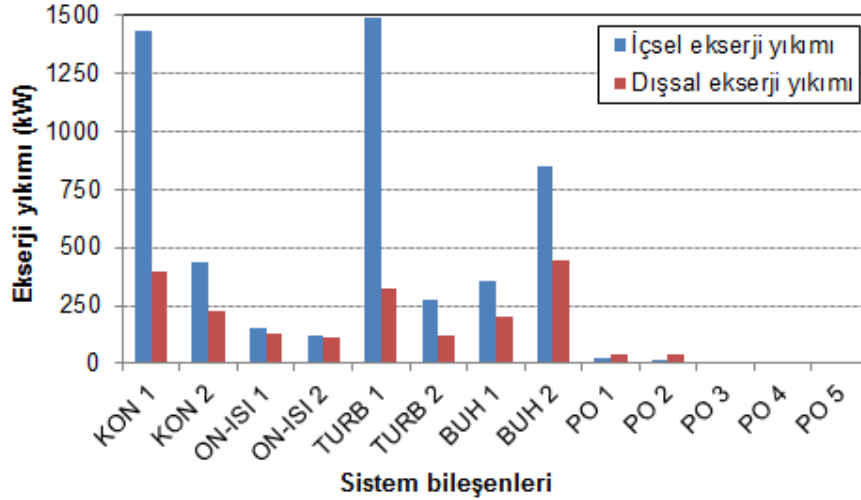
Geleneksel ekserji analizinin sonucu olarak sistemde en verimli bileşenlerin buharlaştırıcılar ve pompalar olduğu görülmektedir. Ekserji yıkım miktarı olarak ise sırasıyla KON 1, TURB 1 ve BUH 2 olarak dizilenmektedir. Ekserji yıkım miktarlarının yüksek olması öncelikle bu bileşenler üzerinde iyileştirme yapılması gerektiğini anlamamızı sağlar. Fakat ekserji yıkımının nedeni, bileşenler arasındaki etkileşimin ne olduğu, iyileştirmenin nasıl yapılması gerektiği konularını anlamamızda yetersiz kalmaktadır.

Bu nedenle sistem bileşenlerinin arasındaki etkileşimi ve iyileştirme potansiyelini belirleyebilecek bir analiz yapılması gerekmektedir. Bu analiz şeklide ileri ekserji analizidir. İleri ekserji analizi, sistemin tümünü değil de bileşen seviyesinde yani sadece bileşen ekserji yıkım miktarlarına göre yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında 13 bileşenden oluşan Bereket jeotermal güç sisteminin ileri ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3.3'te bahsedilen gerçek, teorik ve

kaçınılmaz şartlar kullanılarak 13 bileşenin ekserji yıkımı içsel/dışsal ve kaçınılmaz/önlenebilir parçalara bölünecektir. Böylece sistem bileşenlerindeki ekserji yıkımının azaltılmasındaki kaynakları (içsel/dışsal parçalar) ve potansiyeli (kaçınılmaz/önlenebilir parçalar) görülmüş ve anlaşılmış olacaktır.

Sistem bileşenlerinin dışsal ekserji yıkımlarını hesaplamak için Çizelge 3.3'teki varsayımlar kullanılarak sistemin tüm bileşenleri teorik şartlarda çalışırken hesabı yapılan bileşen gerçek koşullar altında çalıştırılmıştır. Bu varsayım boyunca sistem çıkış gücü sabit tutulmuştur. Bu esnada hesabı yapılan bileşen üzerinde meydana gelen ekserji yıkımı dışsal ekserji yıkımı olarak adlandırılmıştır. Diğer tüm bileşenlerin hesabı yapılan bileşen ile etkileşimleri nedeniyle sebep oldukları ekserji yıkımı olarak da tariflenebilir. İçsel ekserji yıkımı ise hesabı yapılan bileşen ve diğer tüm bileşenlerin gerçek şartlarda çalışması sırasında hesabı yapılan bileşende oluşan ekserji yıkımından (Çizelge 3.2'ye bkz.) dışsal ekserji yıkımının çıkarılması ile elde edilir. Bereket jeotermal güç sistemi için bu hesaplamadan elde edilen bulgular Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



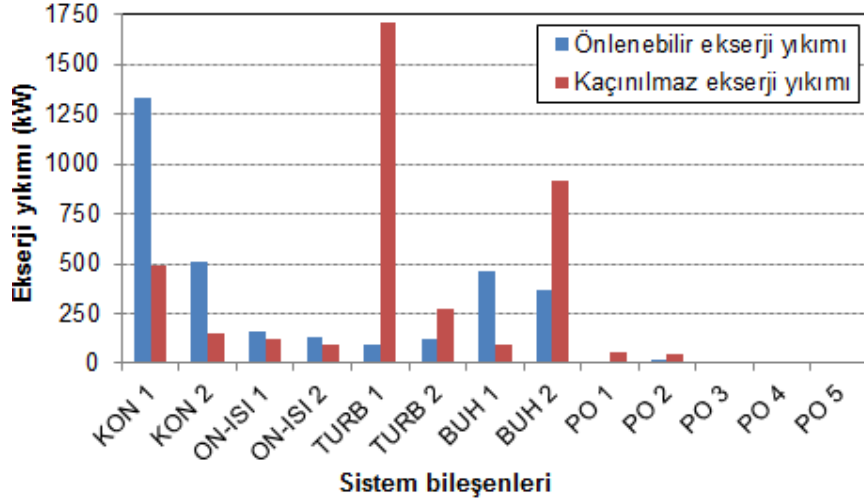
Şekil 4.4. Sistem bileşenlerinin içsel ve dışsal ekserji yıkımlarının değişimi.

Şekil 4.4'ten pompalar dışındaki tüm bileşenlerin ekserji yıkımlarının büyük çoğunlu içsel yani bileşenlerin kendilerinden kaynaklanmaktadır. Özellikle KON 1, TURB 1 ve BUH 2 için içsel dışsal ekserji yıkımı farkı çok büyüktür. KON 1 daha başlangıçta

düşük kapasitede seçilmesi ve sonrasında içersindeki soğutma suyunun kirletici ve körleştirici etkisi kondenserin etkinliğini düşürmesi gibi nedenlerden dolayı içsel ekserji yıkımı daha çok oluşmaktadır. Bu durumda PO 1 ve PO 2 ise KON 1 ve KON 2'deki kirlenme ve körleşme yüzünden basınç düşümleri nedeniyle daha fazla etkilenmektedir. Bu nedenle dışsal ekserji yıkımları içselden daha fazladır. TURB 1 türbinin çıkış sıcaklığı ve soğutma suyu giriş sıcaklığının düşmesi durumunda da KON 1 dışsal olarak etkilenmektedir.

TURB 1'de ise türbin verimi düşüklüğü, sıcaklık farkları, kaçaklar, basınç düşümleri yani kendisinden kaynaklanan 1487 kW'lık ekserji yıkım miktarı çok fazladır. İçsel ekserji yıkımı 321 kW'tır. Buharlaştırıcı BUH 1 çıkışında meydana gelen sıcaklık düşümleri neden olmuştur. İkinci bölümdeki TURB 2 içinde aynı nedenlerden bahsedilebilir. BUH 2 sistem bileşeni birinci bölümdeki BUH 1'dan daha fazla ekserji yıkımına uğramıştır. BUH 1'den çıkan jeotermal akışkanın sıcaklığının oldukça düşmesi bu duruma neden olmuştur. Bu çıkış sıcaklığı arttırılırsa eğer bu sefer BUH 1'in ekserji yıkımını arttıracaktır. Bundan dolayı BUH 2'de BUH 1'in neden olduğu dışsal bir ekserji yıkımı meydana gelmektedir. Eğer sistem üzerinde BUH 1 buharlaştırıcısı içersinde yapılacak bir iyileştirme, TURB 1 türbinin dışsal ekserji yıkımında bir azalmaya neden olacaktır. Ayrıca BUH 2'ninde dışsal ekserji yıkım miktarını azaltacak böylece TURB 2'nin dışsal ekserji yıkım miktarı da azaltılmış olacaktır.

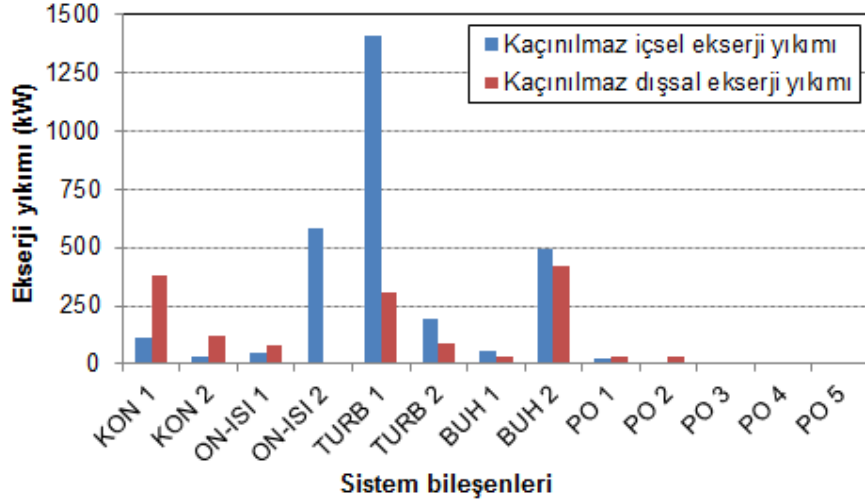
Sistem bileşenlerinin kaçınılmaz ekserji yıkımlarını hesaplamak için Çizelge 3.3'teki mümkün olan en iyi çalışma şartlarını kabul eden varsayımlar kullanılmıştır. Böylece sistemin tüm bileşenleri kaçınılmaz şartlar altında çalıştırıldığında hesabı yapılan bileşen üzerinde meydana gelen ekserji yıkımı kaçınılmaz ekserji yıkımıdır. Önlenebilir ekserji yıkımı ise hesabı yapılan bileşen ve diğer tüm bileşenlerin gerçek şartlarda çalışması sırasında hesabı yapılan bileşende oluşan ekserji yıkımından (Çizelge 3.2'ye bkz.) kaçınılmaz ekserji yıkımının çıkarılması ile elde edilir. Bu hesaplamadan elde edilen bulgular sistem bileşenlerinin önlenebilir ve kaçınılmaz ekserji yıkımlarının değişimi olarak Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Sistem bileşenlerinin önlenebilir ve kaçınılmaz ekserji yıkımlarının değişimi.

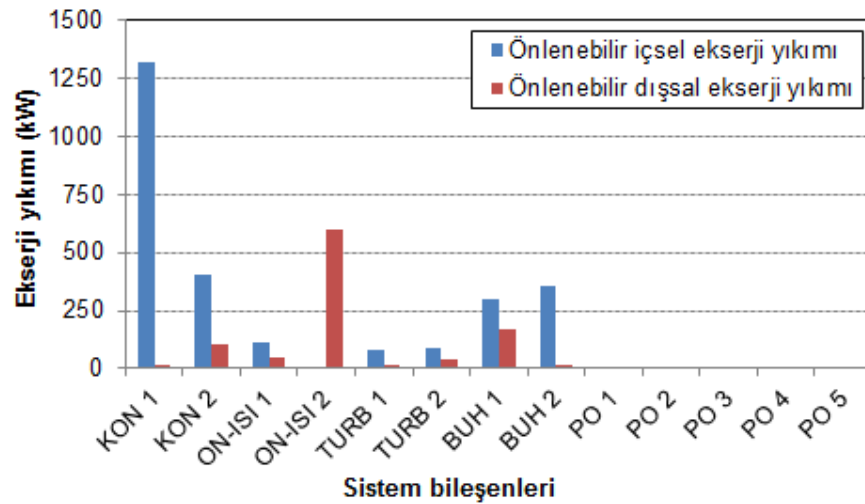
Şekil 4.5'teki grafikte TURB 1, BUH 2, TURB 2, PO 1 ve PO 2 gibi bileşenler haricindeki tüm bileşenlerin önlenebilir ekserji yıkım miktarları kaçınılmaz ekserji yıkım miktarlarından daha yüksektir. Sistemde esas güç üreten ana bileşenler TURB 1 ve TURB 2 türbinlerinin kaçınılmaz ekserji yıkımları çok yüksektir. Buradan bu türbinlerin bakım veya değiştirilmesi gerektiği anlamına gelmektedir. Bu bileşenler üzerinde sırasıyla sadece 93 ve 125 kW'lık bir iyileştirme yapılabileceğini anlaşılmaktadır. Grafikteki bileşenler arasında KON 1 bileşenin 1335 kW'lık önlenebilir enerji yıkım miktarı en yüksek değerdedir. Bu nedenle en yüksek iyileştirme potansiyeline sahip bileşen anlamına gelmektedir. Sonra 510 ve 462 kW'lık değerlerle sırasıyla KON 2 ve BUH 1 bileşenleri gelmektedir.

İleri ekserji analizini daha iyi anlamak için içsel ve dışsal ekserji yıkımı içerisindeki kaçınılmaz ve önlenebilir kısımlar belirlenmelidir. Denklem (3.20) kullanılarak kaçınılmaz içsel ekserji yıkımı hesaplanmıştır. Hesaplanan değer kaçınılmaz ekserji yıkımı miktarından çıkarılarak kaçınılmaz dışsal ekserji yıkımı bulunmuş olur. Elde edilen bulgular Şekil 4.6'da sunulmuştur. Şekilde TURB 1, ON-ISI 2 ve BUH 2 sistem bileşenlerinin içsel ekserji yıkımı miktarı içerisindeki kaçınılmaz kısım daha büyükken KON 1, KON 2 ve ON-ISI 1 bileşenleri için dışsal ekserji yıkımı içerisindeki kaçınılmaz kısım daha büyüktür. 1287 kW'lık gerçek ekserji yıkımına sahip BUH 2 için diğer bileşenlerin sebep olduğu ekserji yıkımı içerisindeki önlenebilir miktar 423 kW'tır.



Şekil 4.6. Sistem bileşenlerinin kaçınılmaz içsel ve dışsal ekserji yıkımlarının değişimi.

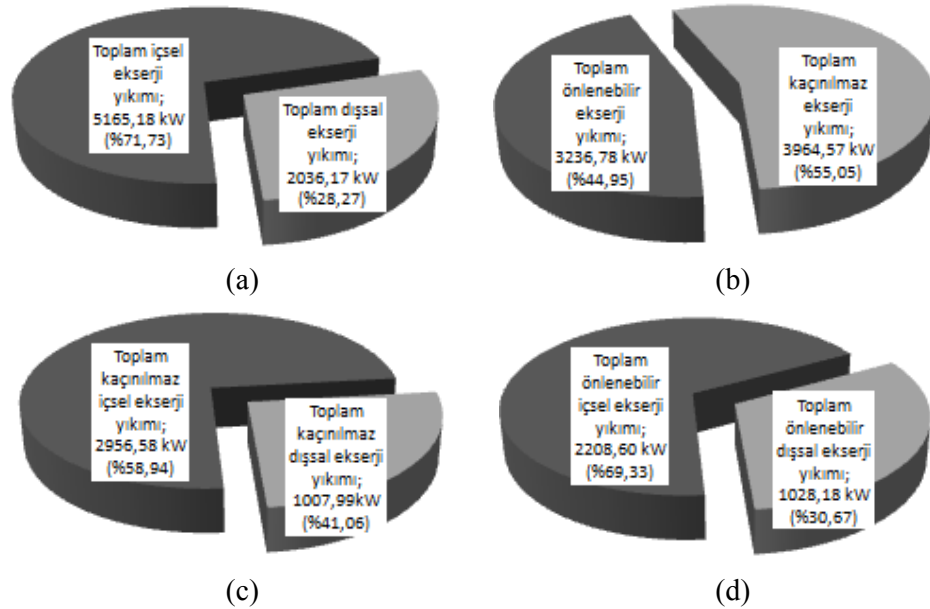
Sistem bileşenlerinin önlenebilir içsel ve dışsal ekserji yıkımlarının değişimi Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Önlenebilir içsel ekserji yıkımı, içsel ekserji yıkımından kaçınılmaz içsel ekserji yıkımı çıkarılarak bulunurken önlenebilir dışsal ekserji yıkımı ise dışsal ekserji yıkımından kaçınılmaz dışsal ekserji yıkımı çıkarılarak bulunur. İleri ekserji analizinin en anlamlı kısmı önlenebilir içsel kısımdır ve bu kısım değerlendirilmelidir. Bu sayede bileşenin kendisinden meydana gelen ekserji yıkımının ne kadarının önlenebileceği (iyileştirme potansiyeli) hakkında bilgi alınabilmektedir.



Şekil 4.7. Sistem bileşenlerinin önlenebilir içsel ve dışsal ekserji yıkımlarının değişimi.

Şekil 4.7’de ON-ISI 2 bileşeni dışındaki tüm bileşenlerde içsel ekserji yıkımının önlenebileceği görülmektedir. Bu bileşendeki bu yıkım BUH 2’den çıkan jeotermal suyun sıcaklığına bağlıdır. Yani BUH 2 ve PO2’ye bağlı olduğu görülmektedir. Bu bileşenlerin iyileştirilmesi sayesinde ON-ISI 2 bileşeni iyileştirilebilecektir.

Sistem bileşenleri arasında KON 1 bileşeni en yüksek önlenebilir içsel ekserji yıkımı miktarına sahiptir ve içsel ekserji yıkımının sadece %72’si önlenebilecektir. Sonra sırasıyla KON 2 ve BUH 2 gelmektedir. Sonuçta ileri ekserji analizinin sonucu olarak sistemde en verimli bileşenler ikinci bölümdeki ön ısıtıcı ve pompalardır. İyileştirme potansiyeli en yüksek bileşenler dizilendiğinde KON 1, KON 2 ve BUH 2 şeklindedir. Ancak geleneksel ekserji analizinde bu sıralama KON 1, TURB 1 ve BUH 2 şeklindeydi. Analizlerde sadece ekserji yıkım miktarlarına bakarak iyileştirmelerin nasıl yapılacağı hakkında bilgiler vermek oldukça güç olmaktadır. Fakat sistem bileşenlerinin birbirleriyle olan etkileşim ve iyileştirme potansiyellerini bilmek yapılacak iyileştirmeleri daha iyi anlamak anlamına gelmektedir. Bu nedenle güç sistemleri analizinde mühendislere ileri ekserji analizi geleneksel ekserji analizinden daha fazla faydalı bilgiler vermektedir.

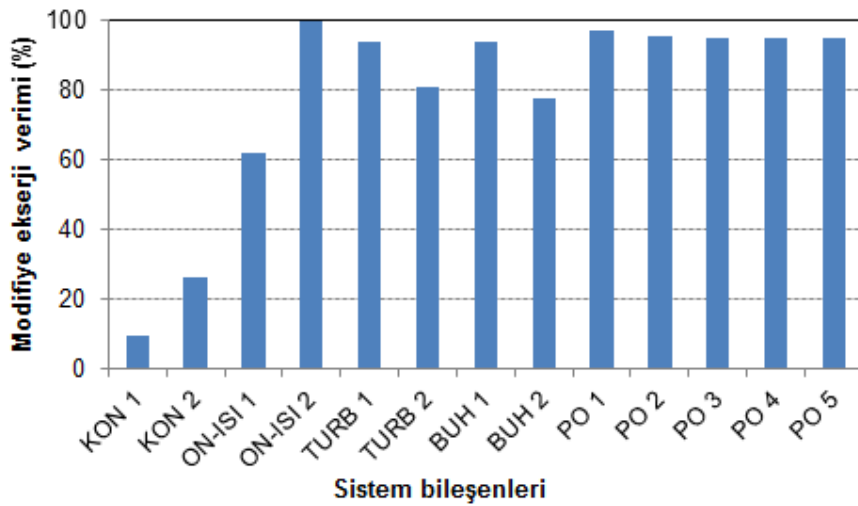


Şekil 4.8. İleri ekserji analizi için sistem bileşenlerinin toplam ekserji yıkımlarının dağılımı: (a) İçsel ve dışsal, (b) Kaçınılmaz ve önenebilir, (c) Kaçınılmaz içsel ve dışsal, (d) Önenebilir içsel ve dışsal.

Tüm sistem için ileri ekserji analizi sonuçları Şekil 4.8’de özetlenmiştir. (a) grafiğinde sistemin toplam içsel ve dışsal ekserji yıkımları sırasıyla sistemin toplam ekserji yıkımının %71,73’lük kısmı bileşenler içersinde meydana gelirken %28,27’si ise diğer bileşenlerin etkileri yüzünden meydana gelmiştir. Bereket jeotermal güç sistemini daha verimli bir sistem haline getirmek için sistem bileşenleri yenileme, bakım ve tamir işlemleri yapılmalıdır. Bu işlemler yapılırsa eğer dışsal ekserji yıkım miktarlarının da düşürülmüş olacaktır. Şekil 4.8’in (b) grafiğinde sistemde toplam kaçınılmaz/önlenebilir ekserji yıkımları gösterilmiş ve sistem toplam kaçınılmaz ekserji yıkımı (%55,05) diğerinden daha yüksektir. Ancak sistem bileşenlerinin önlenebilir ekserji yıkımının %44,95 olması, sistemin iyileştirme potansiyelinin yüksek olduğunu belirtmektedir.

Sistemin bütünü için (c) ve (d) grafiklerinde sırasıyla dışsal/içsel ekserji yıkımı miktarları içersindeki kaçınılmaz ve önlenebilir kısımları gösterilmektedir. Kaçınılmaz içsel ekserji yıkımı dışsal ekserji yıkımından %65,91 daha fazla oluşmaktadır. Bileşenlerde meydana gelen kaçınılmaz kısmın büyük çoğunluğu bileşenler içersinde meydana gelmektedir. Sistem bileşenleri toplam önlenebilir kısmın %69,33’ü içsel ekserji yıkımı iken %30,76’sı dışsal ekserji yıkımıdır. Bileşenler içersinde daha fazla iyileştirme yapılabilecektir.

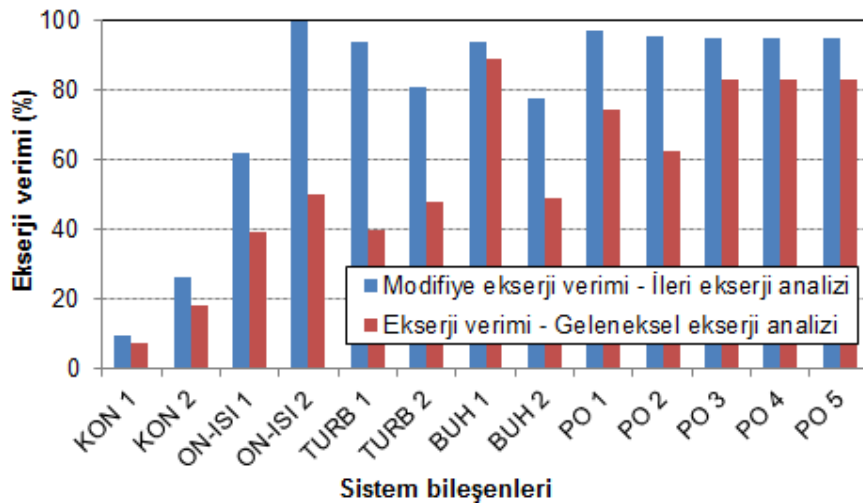
İleri ekserji analizini değerlendirmek için modifiye ekserji verimlerine bakılmalıdır. Şekil 4.9’da sistem bileşenlerinin modifiye ekserji verimi değişimleri verilmiştir.



Şekil 4.9. Sistem bileşenlerinin modifiye ekserji verimi değişimleri.

Şekil 4.9’da en yüksek modifiye ekserji verimi %99,97 ile ON-ISI 2 bileşenine aittir. Tüm pompaların verimleri de yüksek görülmektedir. KON 1, KON 2 ve ON-ISI 1’in verimleri düşük görülmektedir. Yani bu bileşenlere ne kadarda iyileştirme yapılırsa ancak verimleri %9,90, %26,31 ve %62,10 şeklinde olacaktır. Buradan iyileştirme potansiyellerinin de düşük olduğu anlamı çıkarılabilmektedir. Sistemde TURB 1 ve TURB 2 bileşenlerinin modifiye verimleri sırasıyla %94,06 ve %81,05 olarak hesaplanmıştır.

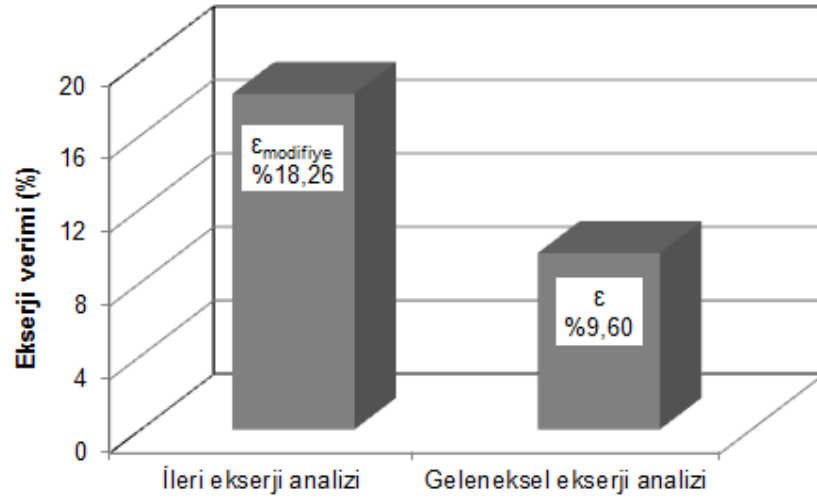
Geleneksel ve ileri ekserji analizleri verimlerinin bir karşılaştırılması Şekil 4.10’da verilmiştir. Bu sayede ileri ekserji analizinin ne kadar anlamlı olduğu görülebilir. Şekilde tüm bileşenlere ait ileri ekserji verim değerleri geleneksel ekserji veriminden yüksek olarak görülmektedir. Buda bir sistem bileşeni üzerinde maksimum iyileştirme yapıldığında bileşen veriminin ancak modifiye ekserji verimi (ya da ileri ekserji analizi verimi) kadar olacağına işaretler. Şekilde TURB 1 ve TURB 2 bileşenleri için gerçek ekserji verimi (geleneksel ekserji analizi) sırasıyla %40,17 ve %47,99 iken sistem üzerinde maksimum iyileştirmeler yapılabildiğinde modifiye ekserji verimleri (ileri ekserji analizi) ancak %94,06 ve %81,05 olacaktır. Şekilden şöyle bir yorumda yapılabilir sistem bileşenleri arasında en az iyileştirme KON 1 ve BUH 1 bileşenlerinde meydana gelmektedir. En fazla fark ise sırasıyla TURB 1, ON-ISI 2 ve TURB 2 bileşenleridir. İleri ve geleneksel ekserji verimleri arasındaki fark çok azdır.



Şekil 4.10. Geleneksel ve ileri ekserji analizleri için sistem bileşenlerinin ekserji verimlerinin değişimi.

Sonuçta geleneksel ekserji analizinde en kötü verime sahip bileşenler KON 1, KON 2, ON-ISI 1 ve TURB1 şeklinde sıralanırken ileri ekserji analizinde KON 1, KON 2, ON-ISI 1 ve BUH 2 şeklinde sıralanmıştır.

Sistemin geneline bakarak ileri ve geleneksel ekserji analizlerine göre toplam ekserji verimlerin karşılaştırılması Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Sistemin gerçek şartlarda toplam sistem verimi %9,60 iken sistem üzerinde yapılabilecek maksimum iyileştirmeler sayesinde verim %18,26’ya çıkarılabilecektir.



Şekil 4.11. Geleneksel ve ileri ekserji analizleri için sistemin toplam ekserji verimlerinin değişimi.

Sonuç olarak burada sunulan sonuçlar ekserji analizi atıkların ve kayıpların yerlerini, tiplerini ve doğru büyüklüklerini belirlemede, daha verimli enerji kullanım amacını sürdürmede ve sistem bileşenlerindeki verimsizlikleri azaltmada daha verimli jeotermal güç sistemlerinin tasarlanmasının mümkün olup olmadığını ve nasıl olduğunu açıklamaya yaramaktadır. Ayrıca kaynak kullanımının azaltmada, çevresel etkileri ve emisyonları düşürmede ve ekonomi gibi diğer faktörlerin değerlendirilmesiyle birleştirildiğinde ileri ekserji analizi sistemleri optimize etmeye yardımcı olabilir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yapılan araştırmalar sonucunda jeotermal ikili güç sistemi teknolojisi konusunda bilgi birikimi elde edilmiştir. Öncelikle dünya ve Türkiye’de jeotermal enerjinin durumu ve kullanım alanları hakkında genel bilgiler verilmiş ve Termodinamiğin İkinci Yasalarına göre ekserji hesaplama denklemleri verilmiştir. Örnek olay çalışması için mevcut bir jeotermal güç santrali olarak Bereket jeotermal güç santrali tanıtılmış, santralin akış özellikleri ve bileşenleri hakkında bilgiler verilmiştir. Gerçek çalışma koşullarında bu sistemden toplanan veriler kullanılarak Termodinamiğin İkinci Yasalarına göre geleneksel ve ileri ekserji analizleri yapılmıştır. Böylece sistem üzerindeki ekserji kayıpların ve yıkımların nerelerde yoğunlaştığı belirtilmiştir.

Gelişen teknoloji ile jeotermal santrallerin verimliliklerinin giderek arttığı gözlemlenmektedir. Bereket jeotermal güç sisteminin jeotermal akışkanının fazla olması, ölü hal sıcaklığının düşük olması, çalışma sıcaklığının yüksek olması; dolayısıyla ekserji girişlerinin fazla olmasına rağmen santral üretiminin miktar ve verimi düşük olması sebebiyle Bereket jeotermal güç sistemi etkin çalışmadığı görülmektedir. Ayrıca Bereket jeotermal güç sisteminin jeotermal akışkanının ısıtma mevsiminde Sarayköy jeotermal bölgesel ısıtma sistemine jeotermal akışkan gönderilmesinden dolayı jeotermal su miktarı düşmekte ve yine verim düşmektedir. Bundan dolayı bu tez çalışmasında toplanan gerçek veriler ısıtma mevsimi içerisinde yapılmıştır.

Sistemde öncelikle geleneksel ekserji analizi yapılmıştır. Santralde en fazla ekserji kayıplarının, jeotermal akışkanın doğaya serbest bırakılması, kondenser, türbin ve buharlaştırıcıda meydana geldiği hesaplanmıştır. Sistemin toplam 10,5 MW’lık ekserji girişine karşın bunun %17,80’i doğaya serbest bırakılmış, %4,18 soğutma suyu hattında kaybolmuş ve %68,42’si ise sistem bileşenleri tarafından ekserji yıkımına neden olmuştur. Geleneksel ekserji analizine göre sistemin toplam ekserji

üretimi 1 MW ve ekserji verimi %9,60 olarak bulunmuştur. Ayrıca birinci ve ikinci bölümlerdeki TURB 1 ve TURB 2 türbinlerde sırasıyla 1,2 ve 0,4 MW'lık güç çıkışı vardır. Santralin ekserji hesaplaması sonucunda en yüksek ekserji yıkımı kondenserlerde meydana gelmektedir. Geleneksel ekserji analizinde en yüksek ekserji yıkımı sıralandırıldığında KON 1, TURB 1, BUH 2, KON 2 ve BUH 1 şeklinde oluşmuştur. Sırasıyla toplam ekserji girişinin %17,37, %17,18, %12,23, %6,26 ve %5,28'i olarak hesaplanmıştır. Bu şekilde öncelikli iyileştirilmesi gereken bileşenlerde sıralanmış olur.

Tez çalışmasının sonraki aşamasında ileri ekserji analizi yapılmıştır. İleri ekserji analizi sistem üzerinde bileşen seviyesinde yapılan bir analizdir. Bu analiz ile sistem bileşenleri arasındaki etkileşimleri veya yapılabilecek iyileştirmenin gerçek potansiyelini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bereket jeotermal güç sisteminde pompalar dışındaki tüm bileşenlerin kendileriyle ilgili ekserji yıkımları kendileri dışında meydana gelen ekserji yıkımların etkisi altındadır. En çok kendilerinden kaynaklanan ekserji yıkımına sahip TURB 1, KON 1 ve BUH 2 bileşenleridir. Ayrıca TURB 1, KON 1, KON 2, BUH 1, ON-ISI 1 ve ON-ISI 2 bileşenlerinde önlenebilecek ekserji yıkım miktarları büyüktür. Diğer bileşenlerde ise kaçınılmaz ekserji yıkımları daha fazladır.

Sistem bileşenleri performansını değerlendirmede sistem bileşenleri arasındaki etkileşimlerde ne kadar önlenebilir ekserji yıkımı olduğunu bilmek elzemdir. KON 1 kondenseri için içsel ekserji yıkımının %92,09'u önlenebilir durumdadır. Böylece en çok önlenebilir içsel ekserji yıkımı miktarı sırasıyla KON 1, KON 2, BUH 2 ve BUH 1 şeklinde sıralanmaktadır. Toplam sistemin içsel ekserji yıkımının %69,33'ü önlenebilirken dışsal ekserji yıkımının %30,57'si önlenebilmektedir.

Sistem bileşenlerinin modifiye ekserji verimleri kondenserler dışındaki tüm bileşenlerin yüksek olduğu görülmüştür. Sistemde en kötü modifiye ekserji verimine sahip KON 1, KON 2, ON-ISI 1, BUH 2 ve TURB 2 bileşenlerin verimleri sırasıyla %9,90, %26,31, %62,10, %77,90 ve %81,05 olarak bulunmuştur. İyileştirme yapılması gereken bileşenlerdir. Geleneksel ekserji analizindeki bileşenlerle sıralandığında farklılık görülmektedir. Geleneksel ekserji analizinde KON 1, TURB 1 ve BUH 2 şeklinde sıralanırken ileri ekserji analizinde KON 1, KON 2 ve ON-ISI 1 şeklinde sıralanmıştır. Böylece ileri ekserji analizi geleneksel ekserji analizinden

daha nitelikli sonuçlar vermiştir. Sonuç olarak sistemin gerçek şartlarda toplam sistem verimi %9,60 iken sistem üzerinde yapılabilecek maksimum iyileştirmeler sayesinde verim %18,26'ya çıkarılabilecektir.

Jeotermal enerjinin yenilenebilir bir enerji türü olması, fosil yakıtların sınırlı oluşu ve bu enerjiye dayalı güç üreten santrallerin çevreye yaydığı kirleticilerin yok denecek kadar az olması bu kaynakları daha verimli kullanmayı gerektirmektedir. Enerji verimliliğini artırmak için enerji üreten mühendislik sistemlerinde dikkatli enerji denetlemeleri yapılmalı ve alternatif çözümler sunulmalıdır. Dolayısıyla yapılan bu çalışma ve benzeri çalışmalar ile diğer tecrübelerden yola çıkılarak jeotermal enerjiden güç üreten sistemlerimizin performansını artırma yoluna gidilmelidir.

Bu çalışmadan sonra farklı güç sistemlerinde gerçek bir karşılaştırma yapmak istendiğinde teknolojik durum, yapı ve işletim açısından önemli bir fark yaratan çeşitli karar parametreleri incelenebilir. Ayrıca bu güç sistemleri üzerinde ekonomik ve çevresel analiz ve değerlendirmeler de yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Aksoy, M. (2012) Jeotermal kaynaklardan elektrik üretimi, İnternet Sitesi: <http://www.ktemo.org/JeotermalKaynaklardanElektrikUretimi.pdf>, Erişim Tarihi: 24.12.2012.
- Bruges, E.A. (1959) *Available Energy and Second Law Analysis*, Butterworth, Londra, İngiltere.
- Cziesla, F., Tsatsaronis, G. ve Gao, Z. (2006) Avoidable thermodynamic inefficiencies and costs in an externally fired combined cycle power plant, *Energy*, 31: 1472-1489.
- Çengel, Y.A. ve Boles, M.A. (1999) *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik*. McGraw-Hill – Literatür Ortak Yayını, İstanbul.
- Çentez, M. (2013). Yer altından gelen enerji: Jeotermal, İnternet Sitesi: <http://www.elektrikport.com/sector-rehberi/yer-altindangelen-enerji-jeotermal/2856#ad-image-0>, Erişim Tarihi: 10.8.2013.
- Çetin, Ç., Gürbüz, H. ve Acar, M. (2007) Jeotermal bölgesel ısıtma sistemleri - Sarayköy bölgesel ısıtma sistemi. *Teskon 2007 Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi*, İzmir, 949-957.
- Çetiner, Ç. (2013) Jeotermal enerji, İnternet Sitesi: http://eng.harran.edu.tr/~ccetiner/jeotermal_enerji_5.pdf, Erişim Tarihi: 22.4.2013.
- Dağdaş, A. (2004) Jeotermal enerjiden yararlanmada Türkiye'nin dünyadaki konumu ve potansiyeli, *Tesisat Mühendisliği*, 80: 38-48.
- DPT (1996) Jeotermal enerji, madencilik özel ihtisas komisyonu enerji hammaddeleri alt komisyonu jeotermal enerji çalışma grubu raporu, Ankara.
- EIE (2013) Bilgi notu, İnternet Sitesi, <http://www.eie.gov.tr/>, Erişim Tarihi: 9.12.2013.

- Elder, J. (1981) *Geothermal Systems*, Academic Press, London, UK.
- ETKB (2013) Jeotermal, İnternet Sitesi, <http://www.enerji.gov.tr/index.php?sf=webpages&b=jeotermal>, Erişim Tarihi: 9.12.2012.
- Etemoğlu, A.B. ve Can, M. (2006) Classification of geothermal resources in Turkey by exergy analysis, *Renew Sustain Energy Rev*, 38: 286-292
- GEKA - Güney Ege Kalkınma Ajansı (2011) TR32 düzey 2 bölgesi (Aydın, Denizli, Muğla) jeotermal kaynakları ve jeotermal enerji santralleri araştırma raporu, Hazırlayan: Emre Kemik, 1-28.
- Hepbasli, A. ve Özgener, L. (2006) Development of geothermal energy utilization in Turkey: A review. *Renew Sustain Energy Rev*, 38: 433-460.
- İleri, A. ve Gürer, T. (1998) Energy and exergy utilization in Turkey during 1995, *Energy*, 23: 1099-1106.
- Kanoğlu, M. (2007) *Jeotermal Güç Santrallerinin İkinci Yasa Analizi*, Teskon 2007 Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretimi Seminer Kitabı, MMO Yayın No: E/2007/437, İzmir, 175-186.
- Kelly, S., Tsatsaronis G. ve Morosuk T. (2009) Advanced exergetic analysis: Approaches for splitting the exergy destruction into endogenous and exogenous parts, *Energy*, 34: 384-391.
- Kestin, J., DiPippo, R., Khalifa, H.E. ve Ryley, D.J. (1980) *Source Book on the Production of Electricity from Geothermal Energy*, US Government Printing Office, Washington, USA.
- Kılıç, F.Ç. ve Kılıç, M.K. (2013) Jeotermal enerji ve Türkiye, *Mühendis ve Makina*, 54: 45-56.
- Köse, R. (2005a) Geothermal energy potential for power generation in Turkey: A case study in Simav, Kutahya, *Renew Sustain Energy Rev*, 11: 497-511.
- Köse, R. (2005b) Research on the generation of electricity from the geothermal resources in Simav region, Turkey, *Renew Energy*, 30: 67-79.

- Lee, K.C. (2001) Classification of geothermal resources by exergy, *Geothermics*, 30: 431-442.
- Morosuk, T. ve Tsatsaronis, G. (2008a) A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines, *Energy*, 33: 890-907.
- Morosuk, T. ve Tsatsaronis, G. (2008b) How to calculate the parts of exergy destruction in an advanced exergetic analysis, *in: Proceedings ECOS*, Cracow-Gliwice, Poland.
- Morosuk, T. ve Tsatsaronis, G. (2009) Advanced exergetic evaluation of refrigeration machines using different working fluids, *Energy*, 34: 2248-2258.
- Morosuk, T. ve Tsatsaronis, G. (2011) Comparative evaluation of LNG based cogeneration systems using advanced exergy analysis, *Energy*, 36: 3771-3778.
- Morosuk, T., Tsatsaronis, G. ve Zhang, C. (2012) Conventional thermodynamic and advanced exergetic analysis of a refrigeration machine using a Voorhees' compression process, *Energy Convers Manage*, 60: 143-151.
- MTA (2005) Türkiye jeotermal kaynakları envanteri, MTA, Ankara.
- ÖRME (1999) *Ucuz ısınma, temiz hava için; jeotermal merkezi ısıtmanın dünyada ve Türkiye'deki durumu ve ekonomisi*, ÖRME Jeotermal Mühendislik, Sanayi ve Ticaret A.Ş. Yayını, Ankara.
- Özcan, A.K. (2011) Jeotermal enerji çalışma notları, İnternet Sitesi: http://www.kursatozcan.com/ders_notlari/kursat_ozcan_jeotermal_enerji.pdf, Erişim Tarihi: 10.12.2012.
- Özgener , L., Hepbaşlı, A. ve Dincer, İ. (2005) Thermo-mechanical exergy analysis of Balcova geothermal district heating system in İzmir, Turkey, *Building Environ*, 40: 1309-1322.
- Özgener, L., Hepbaşlı, A. ve Dinçer, İ. (2005a) Energy and exergy analysis of the Gonen geothermal district heating system, Turkey, *Geometrics*, 34: 632-645.
- Özgener, L., Hepbaşlı, A. ve Dinçer, İ., (2005b) Jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerinde performans değerlendirme parametreleri. *Teskon 2005 Jeotermal*

Enerji Semineri, İzmir, 371-379.

Özgener, L., Hepbaşlı, A. ve Dincer, İ. (2006) Performance investigation of two geothermal district heating systems for building applications: Energy analysis, *Building Environ*, 41: 699-709.

Öztürk, H.K., Atalay, Ö. ve Yılancı, A. (2006) Energy and exergy analysis of Kızıldere geothermal power plant, Turkey, *Energy Sources Part A*, 28: 1415-1424.

Petrakopoulou, F. (2011) *Comparative evaluation of power plants with CO₂ capture: thermodynamic, economic and environmental performance*, Dissertation, Berlin Teknik Üniversitesi, Berlin.

Petrakopoulou F., Tsatsaronis G., Morosuk, T. ve Carassai, A. (2012) Conventional and advanced exergetic analyses applied to a combined cycle power plant, *Energy*, 41: 146-152.

Rinehart, J.S. (1980) *Geysers and Geothermal Energy*, Springer-Verlag, New York, USA.

Rogers, G. ve Mayhew, Y. (1993) *Engineering Thermodynamics Work and Heat Transfer*, 4th edition, Longman Scientific and Technical, England.

Serpen, U. (2005) *Jeotermal Enerjinin Türkiye ve Dünyadaki Kullanımı*, Teskon 2005 Jeotermal Enerji Seminer Kitabı, MMO/E/2005/393-2, İzmir, 435-447.

Serpen, U, Aksoy, N., Öngür, T. ve Korkmaz E.D. (2009) Geothermal energy in Turkey: 2008 update, *Geothermics*, 38: 227-237.

Şimşek, N. (1998) Enerji sorununun çözümünde jeotermal enerji alternatifi. *Ekoloji*, 8: 15-20

Şimşek S. (1985) Geothermal model of Denizli, Sarayköy–Buldan area. *Geothermics*, 14: 393-417.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2009) İnternet Sitesi, www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=jeotermal&bn=234&hn=&nm=384&id=40697, Erişim Tarihi: 04.12.2009.

- Tsatsaronis, G. (1999) *Design optimization using exergoeconomics*, in: *Thermodynamic optimization of complex energy systems*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Tsatsaronis, G. ve Park, M.H. (2002) On avoidable and unavoidable exergy destructions and investment costs in thermal systems, *Energy Convers Manage*, 43: 1259-1270.
- Tsatsaronis, G., Kelly, S. ve Morosuk, T. (2006) Endogenous and exogenous exergy destruction in thermal systems, in: *Proceedings of the ASME IMECE*, Chicago, USA.
- Tsatsaronis, G. ve Morosuk, T. (2007) Advanced exergoeconomic evaluation and its application to compression refrigeration machines, in: *Proceedings of the ASME IMECE*, Seattle, USA.
- Tsatsaronis, G. ve Morosuk, T. (2008a) A general exergy-based method for combining a cost analysis with an environmental impact analysis. Part I. Theoretical development, in: *Proceedings of the ASME IMECE*, Boston, Massachusetts, USA.
- Tsatsaronis, G. ve Morosuk, T. (2008b) A general exergy-based method for combining a cost analysis with an environmental impact analysis. Part II. Application to a cogeneration system, in: *Proceedings of the ASME IMECE*, Boston, Massachusetts, USA.
- Tsatsaronis, G. ve Morosuk, T. (2010) Advanced exergy analysis of a novel system for generating electricity and vaporizing liquefied natural gas, *Energy*, 35: 820-829.
- Türkiye Jeotermal Derneği (2007) İnternet Sitesi, www.jeotermaldernegi.org.tr, Erişim Tarihi: 12.12.2009.

EKLER

EK A. Sistem bileşenlerin her biri için ekserji yıkımı ve ekserji verimini ifade eden denklemler.

Bileşen, k	Ekserji yıkımı	Ekserji verimi
KON 1	$\dot{E}_{Y, KON 1} = (\dot{E}_{13} - \dot{E}_{14}) - (\dot{E}_{22} - \dot{E}_{20})$	$\epsilon_{KON 1} = \frac{\dot{E}_{13} - \dot{E}_{14}}{\dot{E}_{22} - \dot{E}_{20}}$
KON 2	$\dot{E}_{X, KON 2} = (\dot{E}_{18} - \dot{E}_{19}) - (\dot{E}_{23} - \dot{E}_{21})$	$\epsilon_{KON 2} = \frac{\dot{E}_{18} - \dot{E}_{19}}{\dot{E}_{23} - \dot{E}_{21}}$
ON-ISI 1	$\dot{E}_{Y, ON-ISI 1} = (\dot{E}_5 - \dot{E}_7) - (\dot{E}_{11} - \dot{E}_{10})$	$\epsilon_{ON-ISI 1} = \frac{\dot{E}_5 - \dot{E}_7}{\dot{E}_{11} - \dot{E}_{10}}$
ON-ISI 2	$\dot{E}_{Y, ON-ISI 2} = (\dot{E}_6 - \dot{E}_8) - (\dot{E}_{16} - \dot{E}_{15})$	$\epsilon_{ON-ISI 2} = \frac{\dot{E}_6 - \dot{E}_8}{\dot{E}_{16} - \dot{E}_{15}}$
TURB 1	$\dot{E}_{Y, TURB 1} = (\dot{E}_{12} - \dot{E}_{13}) - \dot{W}_{TURB 1}$	$\epsilon_{TURB 1} = \frac{\dot{W}_{TURB 1}}{\dot{E}_{12} - \dot{E}_{13}}$
TURB 2	$\dot{E}_{Y, TURB 2} = (\dot{E}_{17} - \dot{E}_{18}) - \dot{W}_{TURB 2}$	$\epsilon_{TURB 2} = \frac{\dot{W}_{TURB 2}}{\dot{E}_{17} - \dot{E}_{18}}$
BUH 1	$\dot{E}_{Y, BUH 1} = (\dot{E}_2 - \dot{E}_3) - (\dot{E}_{12} - \dot{E}_{11})$	$\epsilon_{BUH 1} = \frac{\dot{E}_2 - \dot{E}_3}{\dot{E}_{12} - \dot{E}_{11}}$
BUH 2	$\dot{E}_{Y, BUH 2} = (\dot{E}_3 - \dot{E}_4) - (\dot{E}_{17} - \dot{E}_{16})$	$\epsilon_{BUH 2} = \frac{\dot{E}_3 - \dot{E}_4}{\dot{E}_{17} - \dot{E}_{16}}$
PO 1	$\dot{E}_{Y, PO 1} = (\dot{E}_{10} - \dot{E}_{14}) - \dot{W}_{PO 1}$	$\epsilon_{PO 1} = \frac{\dot{E}_{10} - \dot{E}_{14}}{\dot{W}_{PO 1}}$
PO 2	$\dot{E}_{Y, PO 2} = (\dot{E}_{15} - \dot{E}_{19}) - \dot{W}_{PO 2}$	$\epsilon_{PO 2} = \frac{\dot{E}_{15} - \dot{E}_{19}}{\dot{W}_{PO 2}}$
PO 3	$\dot{E}_{Y, PO 3} = (\dot{E}_{30} - \dot{E}_{25}) - \dot{W}_{PO 3}$	$\epsilon_{PO 3} = \frac{\dot{E}_{30} - \dot{E}_{25}}{\dot{W}_{PO 3}}$
PO 4	$\dot{E}_{Y, PO 4} = (\dot{E}_{29} - \dot{E}_{26}) - \dot{W}_{PO 4}$	$\epsilon_{PO 4} = \frac{\dot{E}_{29} - \dot{E}_{26}}{\dot{W}_{PO 4}}$
PO 5	$\dot{E}_{Y, PO 5} = (\dot{E}_{28} - \dot{E}_{27}) - \dot{W}_{PO 5}$	$\epsilon_{PO 5} = \frac{\dot{E}_{28} - \dot{E}_{27}}{\dot{W}_{PO 5}}$

EK B. Bereket jeotermal güç sisteminin ileri ekserji analizi sonuçları.

Bileşen, k	Ė _{Y,k} ^{Gercak} (kW)	Ė _{Y,k} ^{IC} (kW)	Ė _{Y,k} ^{DIS} (kW)	Ė _{Y,k} ^{ON} (kW)	Ė _{Y,k} ^{KA} (kW)	Ė _{Y,k} ^{KA} (kW)		Ė _{Y,k} ^{ON} (kW)	
						Ė _{Y,k} ^{KA,IC} (kW)	Ė _{Y,k} ^{KA,DIS} (kW)	Ė _{Y,k} ^{ON,IC} (kW)	Ė _{Y,k} ^{ON,DIS} (kW)
KON 1	1828	1435,65	392,35	1335,34	492,66	113,611	379,049	1322,039	13,301
KON 2	658,7	435,80	222,90	510,11	148,59	28,876	119,714	406,924	103,186
ON-ISI 1	282,9	156,45	126,45	159,39	123,51	45,580	77,930	110,870	48,520
ON-ISI 2	230,7	121,87	108,83	135,62	95,08	582,931	-487,851	-461,061	596,681
TURB 1	1808	1487,43	320,57	93,00	1715,00	1410,798	304,202	76,632	16,368
TURB 2	399,9	276,08	123,82	125,00	274,90	189,779	85,121	86,301	38,699
BUH 1	555,4	356,21	199,19	462,10	93,30	59,655	33,645	296,555	165,545
BUH 2	1287	846,10	440,90	371,05	915,95	492,884	423,066	353,216	17,834
PO 1	64,22	25,26	38,96	10,32	53,90	20,332	33,568	4,928	5,392
PO 2	55,75	13,29	42,46	13,40	42,35	9,192	33,158	4,098	9,302
PO 3	10,26	3,68	6,58	7,15	3,11	0,983	2,127	2,697	4,453
PO 4	10,26	3,68	6,58	7,15	3,11	0,983	2,127	2,697	4,453
PO 5	10,26	3,68	6,58	7,15	3,11	0,983	2,127	2,697	4,453
Tüm Sistem	7201,35	5165,18	2036,17	3236,78	3964,57	2956,58	1007,99	2208,60	1028,18

**EK C. Ekserji analizi için Mühendislik Denklem Çözücü (Engineering Equation Solver – EES)
ara yüzü.**

$T_0 = 16$ [C]
 $T_{01} = 289.15$ [K]
 $P_0 = 101.325$ [kPa]
 $T_{00} = 16$ [C]
 $T_{001} = 289.15$ [K]
 $P_{00} = 101.325$ [kPa]

$T_1 = 145$ [C]
 $P_1 = 420$ [kPa]
 $m_1 = 111.1$ [kg/s]

$T_2 = 145$ [C]
 $P_2 = 420$ [kPa]
 $m_2 = 111.1$ [kg/s]

$T_3 = 105$ [C]
 $P_3 = 320$ [kPa]
 $m_3 = 111.1$ [kg/s]

$T_4 = 79$ [C]
 $P_4 = 260$ [kPa]
 $m_4 = 111.1$ [kg/s]

$T_5 = 79$ [C]
 $P_5 = 260$ [kPa]
 $m_5 = 55.56$ [kg/s]

$T_6 = 79$ [C]
 $P_6 = 260$ [kPa]
 $m_6 = 55.56$ [kg/s]

$T_7 = 67$ [C]
 $P_7 = 170$ [kPa]
 $m_7 = 55.56$ [kg/s]

$T_8 = 67$ [C]
 $P_8 = 170$ [kPa]
 $m_8 = 55.56$ [kg/s]

$T_9 = 67$ [C]
 $P_9 = 101.325$ [kPa]
 $m_9 = 111.1$ [kg/s]

$T_{10} = 29$ [C]
 $P_{10} = 1000$ [kPa]
 $m_{10} = 130$ [kg/s]

$T_{11} = 40$ [C]
 $P_{11} = 900$ [kPa]
 $m_{11} = 130$ [kg/s]

$T_{12} = 117$ [C]
 $P_{12} = 900$ [kPa]
 $m_{12} = 130$ [kg/s]

$T_{13} = 80$ [C]
 $P_{13} = 400$ [kPa]
 $m_{13} = 130$ [kg/s]

$T_{14} = 29$ [C]
 $P_{14} = 108$ [kPa]
 $m_{14} = 130$ [kg/s]

$T_{15} = 29$ [C]
 $P_{15} = 500$ [kPa]
 $m_{15} = 150$ [kg/s]

$T_{16} = 40$ [C]
 $P_{16} = 500$ [kPa]

$m_{16} = 150$ [kg/s]

$T_{17} = 69$ [C]
 $P_{17} = 450$ [kPa]
 $m_{17} = 150$ [kg/s]

$T_{18} = 55$ [C]
 $P_{18} = 250$ [kPa]
 $m_{18} = 150$ [kg/s]

$T_{19} = 29$ [C]
 $P_{19} = 108$ [kPa]
 $m_{19} = 150$ [kg/s]

$T_{20} = 16$ [C]
 $P_{20} = 101.325$ [kPa]
 $m_{20} = 416.67$ [kg/s]

$T_{21} = 16$ [C]
 $P_{21} = 101.325$ [kPa]
 $m_{21} = 416.67$ [kg/s]

$T_{22} = 23$ [C]
 $P_{22} = 101.325$ [kPa]
 $m_{22} = 416.67$ [kg/s]

$T_{23} = 23$ [C]
 $P_{23} = 101.325$ [kPa]
 $m_{23} = 416.67$ [kg/s]

$T_{24} = 23$ [C]
 $P_{24} = 101.325$ [kPa]
 $m_{24} = 833.33$ [kg/s]

$T_{25} = 23$ [C]
 $P_{25} = 101.325$ [kPa]
 $m_{25} = 277.78$ [kg/s]

$T_{26} = 23$ [C]
 $P_{26} = 101.325$ [kPa]
 $m_{26} = 277.78$ [kg/s]

$T_{27} = 23$ [C]
 $P_{27} = 101.325$ [kPa]
 $m_{27} = 277.78$ [kg/s]

$T_{28} = 23.3$ [C]
 $P_{28} = 250$ [kPa]
 $m_{28} = 277.78$ [kg/s]

$T_{29} = 23.3$ [C]
 $P_{29} = 250$ [kPa]
 $m_{29} = 277.78$ [kg/s]

$T_{30} = 23.3$ [C]
 $P_{30} = 250$ [kPa]
 $m_{30} = 277.78$ [kg/s]

$h_0 = \text{ENTHALPY (water, } T = T_0, P = P_0)$
 $s_0 = \text{Entropy (water, } T = T_0, P = P_0)$
 $h_{00} = \text{ENTHALPY (n-pentane, } T = T_{00}, P = P_{00})$
 $s_{00} = \text{Entropy (n-pentane, } T = T_{00}, P = P_{00})$
 $h_1 = \text{ENTHALPY (steam, } T = T_1, P = P_1)$
 $s_1 = \text{Entropy (steam, } T = T_1, P = P_1)$
 $h_2 = \text{ENTHALPY (steam, } T = T_2, P = P_2)$
 $s_2 = \text{Entropy (steam, } T = T_2, P = P_2)$
 $h_3 = \text{ENTHALPY (water, } T = T_3, P = P_3)$
 $s_3 = \text{Entropy (water, } T = T_3, P = P_3)$
 $h_4 = \text{ENTHALPY (water, } T = T_4, P = P_4)$
 $s_4 = \text{Entropy (water, } T = T_4, P = P_4)$

```

h_5 = ENTHALPY (water, T = T_5, P = P_5)
s_5 = Entropy (water, T = T_5, P = P_5)
h_6 = ENTHALPY (water, T = T_6, P = P_6)
s_6 = Entropy (water, T = T_6, P = P_6)
h_7 = ENTHALPY (water, T = T_7, P = P_7)
s_7 = Entropy (water, T = T_7, P = P_7)
h_8 = ENTHALPY (water, T = T_8, P = P_8)
s_8 = Entropy (water, T = T_8, P = P_8)
h_9 = ENTHALPY (water, T = T_9, P = P_9)
s_9 = Entropy (water, T = T_9, P = P_9)
h_10 = ENTHALPY (n-pentane, T = T_10, P = P_10)
s_10 = Entropy (n-pentane, T = T_10, P = P_10)
h_11 = ENTHALPY (n-pentane, T = T_11, P = P_11)
s_11 = Entropy (n-pentane, T = T_11, P = P_11)
h_12 = ENTHALPY (n-pentane, T = T_12, P = P_12)
s_12 = Entropy (n-pentane, T = T_12, P = P_12)
h_13 = ENTHALPY (n-pentane, T = T_13, P = P_13)
s_13 = Entropy (n-pentane, T = T_13, P = P_13)
h_14 = ENTHALPY (n-pentane, T = T_14, P = P_14)
s_14 = Entropy (n-pentane, T = T_14, P = P_14)
h_15 = ENTHALPY (n-pentane, T = T_15, P = P_15)
s_15 = Entropy (n-pentane, T = T_15, P = P_15)
h_16 = ENTHALPY (n-pentane, T = T_16, P = P_16)
s_16 = Entropy (n-pentane, T = T_16, P = P_16)
h_17 = ENTHALPY (n-pentane, T = T_17, P = P_17)
s_17 = Entropy (n-pentane, T = T_17, P = P_17)
h_18 = ENTHALPY (n-pentane, T = T_18, P = P_18)
s_18 = Entropy (n-pentane, T = T_18, P = P_18)
h_19 = ENTHALPY (n-pentane, T = T_19, P = P_19)
s_19 = Entropy (n-pentane, T = T_19, P = P_19)
h_20 = ENTHALPY (water, T = T_20, P = P_20)
s_20 = Entropy (water, T = T_20, P = P_20)
h_21 = ENTHALPY (water, T = T_21, P = P_21)
s_21 = Entropy (water, T = T_21, P = P_21)
h_22 = ENTHALPY (water, T = T_22, P = P_22)
s_22 = Entropy (water, T = T_22, P = P_22)
h_23 = ENTHALPY (water, T = T_23, P = P_23)
s_23 = Entropy (water, T = T_23, P = P_23)
h_24 = ENTHALPY (water, T = T_24, P = P_24)
s_24 = Entropy (water, T = T_24, P = P_24)
h_25 = ENTHALPY (water, T = T_25, P = P_25)
s_25 = Entropy (water, T = T_25, P = P_25)
h_26 = ENTHALPY (water, T = T_26, P = P_26)
s_26 = Entropy (water, T = T_26, P = P_26)
h_27 = ENTHALPY (water, T = T_27, P = P_27)
s_27 = Entropy (water, T = T_27, P = P_27)
h_28 = ENTHALPY (water, T = T_28, P = P_28)
s_28 = Entropy (water, T = T_28, P = P_28)
h_29 = ENTHALPY (water, T = T_29, P = P_29)
s_29 = Entropy (water, T = T_29, P = P_29)
h_30 = ENTHALPY (water, T = T_30, P = P_30)
s_30 = Entropy (water, T = T_30, P = P_30)

E_1 = m_1*((h_1 - h_0)-(T_01*(s_1-s_0)))
E_2 = m_2*((h_2 - h_0)-(T_01*(s_2-s_0)))
E_3 = m_3*((h_3 - h_0)-(T_01*(s_3-s_0)))
E_4 = m_4*((h_4 - h_0)-(T_01*(s_4-s_0)))
E_5 = m_5*((h_5 - h_0)-(T_01*(s_5-s_0)))
E_6 = m_6*((h_6 - h_0)-(T_01*(s_6-s_0)))
E_7 = m_7*((h_7 - h_0)-(T_01*(s_7-s_0)))
E_8 = m_8*((h_8 - h_0)-(T_01*(s_8-s_0)))
E_9 = m_9*((h_9 - h_0)-(T_01*(s_9-s_0)))
E_10 = m_10*((h_10 - h_00)-(T_001*(s_10-s_00)))
E_11 = m_11*((h_11 - h_00)-(T_001*(s_11-s_00)))
E_12 = m_12*((h_12 - h_00)-(T_001*(s_12-s_00)))
E_13 = m_13*((h_13 - h_00)-(T_001*(s_13-s_00)))
E_14 = m_14*((h_14 - h_00)-(T_001*(s_14-s_00)))
E_15 = m_15*((h_15 - h_00)-(T_001*(s_15-s_00)))
E_16 = m_16*((h_16 - h_00)-(T_001*(s_16-s_00)))
E_17 = m_17*((h_17 - h_00)-(T_001*(s_17-s_00)))
E_18 = m_18*((h_18 - h_00)-(T_001*(s_18-s_00)))
E_19 = m_19*((h_19 - h_00)-(T_001*(s_19-s_00)))
E_20 = m_20*((h_20 - h_0)-(T_01*(s_20-s_0)))

E_21 = m_21*((h_21 - h_0)-(T_01*(s_21-s_0)))
E_22 = m_22*((h_22 - h_0)-(T_01*(s_22-s_0)))
E_23 = m_23*((h_23 - h_0)-(T_01*(s_23-s_0)))
E_24 = m_24*((h_24 - h_0)-(T_01*(s_24-s_0)))
E_25 = m_25*((h_25 - h_0)-(T_01*(s_25-s_0)))
E_26 = m_26*((h_26 - h_0)-(T_01*(s_26-s_0)))
E_27 = m_27*((h_27 - h_0)-(T_01*(s_27-s_0)))
E_28 = m_28*((h_28 - h_0)-(T_01*(s_28-s_0)))
E_29 = m_29*((h_29 - h_0)-(T_01*(s_29-s_0)))
E_30 = m_30*((h_30 - h_0)-(T_01*(s_30-s_0)))

E_pre_heat_1_F = (E_5-E_7)
E_pre_heat_1_P = (E_11-E_10)
I_pre_heat_1 = E_pre_heat_1_F-E_pre_heat_1_P
E_pre_heat_2_F = (E_6-E_8)
E_pre_heat_2_P = (E_16-E_15)
I_pre_heat_2 = E_pre_heat_2_F-E_pre_heat_2_P

E_vap_1_F = (E_2-E_3)
E_vap_1_P = (E_12 - E_11)
I_vap_1 = E_vap_1_F-E_vap_1_P
E_vap_2_F = (E_3-E_4)
E_vap_2_P = (E_17-E_16)
I_vap_2 = E_vap_2_F-E_vap_2_P

E_con_1_F = (E_13-E_14)
E_con_1_P = (E_22-E_20)
I_con_1 = E_con_1_F-E_con_1_P
E_con_2_F = (E_18-E_19)
E_con_2_P = (E_23-E_21)
I_con_2 = E_con_2_F-E_con_2_P

W_turb_1= 1214 [kW]
W_turb_2= 369 [kW]
E_turb_1_F = (E_12-E_13)
E_turb_2_F = (E_17-E_18)
I_turb_1 = E_turb_1_F-(W_turb_1)
I_turb_2 = E_turb_2_F-(W_turb_2)

W_pump_1=250 [kW]
E_pump_1_P = (E_10-E_14)
I_pump_1 = W_pump_1-E_pump_1_P

W_pump_2=150 [kW]
E_pump_2_P = (E_15-E_19)
I_pump_2 = W_pump_2-E_pump_2_P

W_pump_3=60 [kW]
E_pump_3_P = (E_30-E_25)
I_pump_3 = W_pump_3-E_pump_3_P

W_pump_4=60 [kW]
E_pump_4_P = (E_29-E_26)
I_pump_4 = W_pump_4-E_pump_4_P

W_pump_5=60 [kW]
E_pump_5_P = (E_28-E_27)
I_pump_5 = W_pump_5-E_pump_5_P

I_total=
I_vap_1+I_vap_2+I_con_1+I_con_2+I_pre_heat_1+I_pre_heat_2+I_pump_1+I_pump_2+I_pump_3+I_pump_4
+I_pump_5+I_turb_1+I_turb_2

Q_loss= (E_30+E_29+E_28)-(E_20+E_21)+E_9

E_output = E_1-Q_loss-I_total

epsilon= (E_2-Q_loss-I_total)*100/E_1

eta= (W_turb_1+W_turb_2)*100/E_1

```


ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Harun Gökgedik
Uyruk : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : 13/10/1983
Medeni Hali : Bekar
Telefon : 0 505 651 5141
E-posta : harung@hotmail.com

Eğitim

Alınan Derece	Aldığı Kurum/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lise	Muğla Anadolu Teknik Lisesi	2001
Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi	2007
Yüksek Lisans	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi	2013

İş Tecrübesi

Yıl	Yer	Pozisyon/görev
2008-	Akyaka / Ula - Muğla	Zabıta Memuru

Yabancı Dil

İngilizce	Başlangıç	Orta	İleri
Yazma	X		
Konuşma			X
Anlama			X
Okuma		X	

Bilimsel Faaliyetler

-

Yayımlar

-