

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÖMÜRLE ÇALIŞAN BİR TERMİK SANTRALİN
EKSERGOEKONOMİK ANALİZİ VE UYGULAMASI

Fatih KARATAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Programı

Danışman
Doç. Dr. Burhanettin ÇETİN

Haziran, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÖMÜRLE ÇALIŞAN BİR TERMİK SANTRALİN
EKSERGOEKONOMİK ANALİZİ VE UYGULAMASI**

Fatih KARATAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 08.06.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Enerji Tezli Yüksek Lisans Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Burhanettin ÇETİN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Burhanettin ÇETİN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ

İstanbul Üniversitesi

Doç. Dr. Ali Volkan AKKAYA

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Burhanettin ÇETİN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Kömürle Çalışan Bir Termik Santralin Eksergoekonomik Analizi ve Uygulaması başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Fatih KARATAŞ

İmza

TEŐEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgisi, tecrübesi, emeği ve desteğiyle beni yönlendiren değerli hocam Sayın Doç.Dr. Burhanettin ÇETİN'e sonsuz minnet ve teőekkürlerimi sunarım.

Fatih KARATAŞ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.1.1 Ekserji Analizi	2
1.1.2 Eksergoekonomik Analiz.....	5
1.2 Tezin Amacı	10
1.3 Hipotez	11
1.4 Tezin Kapsamı	11
1.5 Tezin Yöntemi.....	11
2 TERMODİNAMİK KORELASYON VE YASALAR	12
2.1 Termodinamiğin Birinci Yasası	12
2.2 Termodinamiğin İkinci Yasası.....	13
2.3 Termodinamiğin 1. ve 2. Yasası ile Kelvin Plank ve Clasius İfadeleri	13
3 ENERJİ VE EKSERJİ KAVRAMI	14
3.1 Enerji Kavramı	14
3.2 Ekserji Kavramı ve Analizi.....	15
3.2.1 Ekserji Bozunumu İlkesi ve Ekserji Yok Oluşu	15
4 UYGULAMA	24
4.1 Çan Temik Santrali.....	24
4.2 Santral Ekipmanları Enerji Kayıpları	30
4.2.1 Kazan Enerji Kaybı Hesaplaması.....	31
4.2.2 Yüksek Basınç Türbini Enerji Kaybı Hesaplaması.....	35
4.2.3 Orta Basınç Türbini Enerji Kaybı Hesaplaması	36

4.2.4 Alçak Basınç Türbini Enerji Kaybı Hesaplaması	36
4.2.5 Kondenser Enerji Kaybı Hesaplaması	37
4.2.6 Kondenser Tahliye Pompası Enerji Kaybı Hesaplaması	38
4.2.7 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1 Enerji Kaybı Hesaplaması	38
4.2.8 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 2 Enerji Kaybı Hesaplaması	39
4.2.9 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 3 Enerji Kaybı Hesaplaması	39
4.2.10 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 4 Enerji Kaybı Hesaplaması	40
4.2.11 Degazör Enerji Kaybı Hesaplaması.....	40
4.2.12 Kazan Besleme Pompası Enerji Kaybı Hesaplaması	41
4.2.13 Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1 Enerji Kaybı Hesaplaması....	41
4.2.14 Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 2 Enerji Kaybı Hesaplaması....	41
4.3 Santral Ekipmanları Ekserji Kayıpları.....	42
4.3.1 Akımların Ekserji Değerleri.....	42
4.3.2 Yakıt, Baca Gazı ve Yakma Havası Ekserji Değerleri.....	80
4.3.3 Ekipman Ekserji Kayıpları	86
4.3.4 Ekipman Ekserji Kayıpları Oranları	91
4.4 Santralin Ekonomik Açıdan İncelenmesi	96
4.4.1 Santraldeki Ekipmanların Seviyelendirilmiş Maliyetleri.....	96
4.4.2 Santraldeki Ekipmanların Eksergoekonomik Parametreleri.....	100
4.5 Akımların Sıcaklık ve Basınç Değerleri Değişimi ile Analiz	113
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	125
KAYNAKÇA	127
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	130

SİMGE LİSTESİ

P	Basınç, Pa
A _i	Bir değere getirilme faktörü, birimsiz
c	Birim Ekserji Fiyatı
\dot{E}	Ekserji, kW
C	Ekserji fiyatı \$/kJ
E	Enerji, kW
h	Entalpi, kJ/kg
S	Entropi, kJ/K
R	Gaz Sabiti (kJ/kmolK)
V	Hacim, m^3
v	Hız, m/s
Q	Isı enerjisi, kJ
U	İç Enerji (kJ)
W	İş, J
CRF	Kapital geri kazanım faktörü
m	Kütleli debi, kg/s
C	Özgül ısı, kJ/°C
v	Özgül hacim, m^3/kg
CELF	Sabit eskalasyon düzeltme faktörü, birimsiz
T	Sıcaklık °C, K
e	Spesifik ekserji, kJ/kg
f	Termoekonomik Faktör
I	Tersinmezlik, kJ
g	Yer çekim ivmesi, m/s^2

KISALTMA LİSTESİ

ABT	Alçak Basınç Türbini
ABSI	Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı
AID	Alt Isıl Değer
CELF	Sabit Eskalasyonlu Seviyelendirme Faktörü
KBP	Kazan Besleme Suyu Pompası
KE	Kinetik Enerji
KTP	Kondenser Tahliye Pompası
OBT	Orta Basınç Türbini
PE	Potansiyel Enerji
SM	Seviyelendirilmiş Maliyet
TKİ	Türkiye Kömür İşletmeleri
YBSI	Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı
YBT	Yüksek Basınç Türbini

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 4.1 Çan termik santrali şematik gösterimi	26
Şekil 4.2 Çan termik santrali.....	26
Şekil 4.3 Çan termik santrali ekipmanları şematik gösterimi	27
Şekil 4.4 Kazan şematik gösterimi	31
Şekil 4.5 Yüksek basınç türbini şematik gösterimi.....	35
Şekil 4.6 Orta basınç türbini şematik gösterimi.....	36
Şekil 4.7 Alçak basınç türbini şematik gösterimi	36
Şekil 4.8 Kondenser şematik gösterimi.....	37
Şekil 4.9 Kondenser tahliye pompası şematik gösterimi	38
Şekil 4.10 Alçak basınç besleme suyu ısıtıcısı 1 şematik gösterimi	38
Şekil 4.11 Alçak basınç besleme suyu ısıtıcısı 2 şematik gösterimi	39
Şekil 4.12 Alçak basınç besleme suyu ısıtıcısı 3 şematik gösterimi	39
Şekil 4.13 Alçak basınç besleme suyu ısıtıcısı 4 şematik gösterimi	40
Şekil 4.15 Kazan besleme pompası şematik gösterimi	41
Şekil 4.16 Yüksek basınç besleme suyu ısıtıcısı 1 şematik gösterimi	41
Şekil 4.17 Yüksek basınç besleme suyu ısıtıcısı 2 şematik gösterimi	41
Şekil 4.18 17 numaralı akımın basıncı ve kazan ekserji kaybı değişim grafiği	113
Şekil 4.19 17 numaralı akımın basıncı ve türbin grubu ekserji kaybı değişimi	114
Şekil 4.20 17 numaralı akımın basıncı ve birim ekserji maliyeti değişimi.....	114
Şekil 4.21 17 numaralı akımın sıcaklığı ve kazan ekserji kaybı değişimi	115
Şekil 4.22 17 numaralı akımın sıcaklığı ve türbin grubu ekserji kaybı değişimi ..	116
Şekil 4.23 17 numaralı akımın sıcaklığı ve akımın birim ekserji maliyeti değişimi	116
Şekil 4.24 22 numaralı akımın basıncı ve kazan ekserji kaybı değişimi	117
Şekil 4.25 22 numaralı akımın basıncı ve türbin grubu ekserji kaybı değişimi	118
Şekil 4.26 22 numaralı akımın basıncı ve birim ekserji maliyeti değişimi.....	118
Şekil 4.27 22 numaralı akımın sıcaklığı ve kazan ekserji kaybı değişimi	119
Şekil 4.28 22 numaralı akımın sıcaklığı ve türbin grubu ekserji kaybı değişimi ..	120
Şekil 4.29 22 numaralı akımın sıcaklığı ve birim ekserji maliyeti değişimi	120
Şekil 4.30 36 numaralı akımın basıncı ve kondenser ekserji kaybı değişimi.....	121

Şekil 4.31 36 numaralı akımın sıcaklığı ve kondenser ekserji kaybı değişimi	122
Şekil 4.32 Santral yıllık çalışma süresi ve kazan seviyelendirilmiş maliyet değişimi	123
Şekil 4.33 Santral yıllık çalışma süresi ve türbin grubu seviyelendirilmiş maliyet değişimi	123
Şekil 4.34 Santral yıllık çalışma süresi ve kondenser seviyelendirilmiş maliyet değişimi	124

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 Çan termik santrali yıllık elektrik üretimi tablosu	25
Tablo 4.2 Akımların sıcaklık, basınç, debi değerleri	28
Tablo 4.3 Akımların sıcaklık, basınç, debi değerleri (devamı).....	29
Tablo 4.4 Akımların entalpi, entropi değerleri.....	29
Table 4.5 Akımların entalpi, entropi değerleri (devamı)	30
Tablo 4.6 Baca gazı bileşenleri entalpi değerleri.....	33
Tablo 4.7 Bazı maddelerin standart kimyasal ekserjileri	45
Tablo 4.8 Akımların fiziksel, kimyasal ve toplam ekserji değerleri	79
Tablo 4.9 Santral ekipmanları ekserji kayıpları.....	91
Tablo 4.10 Santral ekipmanları ekserji kayıp oranları	95
Tablo 4.11 Santral ekipmanları ilk yatırım ve işletme maliyetleri.....	96
Tablo 4.12 Santral ekipmanları kayıp ekserji maliyetleri	112

Kömürle Çalışan Bir Termik Santralin Eksergoekonomik Analizi ve Uygulaması

Fatih KARATAŞ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Burhanettin ÇETİN

Enerjiye duyulan ihtiyaç teknolojinin gelişmesiyle artması ve üretilen enerjinin talebi karşılayamaması üzerine enerji santrallerinde verimlilik arttırılması üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Çevre faktörleri dikkate alındığında enerji üretim sisteminde çalışan makinelerin, sistemlerin verimi göz önüne alınarak yakıttan elde edilebilecek maksimum enerji bellidir. Bu sınırlar dahilinde yapılan analiz de ekserji analizidir. Bu analize ekonomi dahil edildiğinde eksergoekonomik analiz olmaktadır.

Hesaplamalar, akış noktalarındaki sıcaklık, basınç değerleri kullanılarak bunlara ait entalpi ve entropi değerlerinin bulunması ile başlamıştır. Elde edilen bu değerler ve yakıt, yakma havası, baca gazı enerji değerleri kullanılarak ekipmanların enerji kayıpları elde edilmiştir. Bunun ardından akımlarla baca gazı, yakma havası, yakıtın fiziksel, kimyasal ekserjileri hesaplanarak burada elde edilen bilgiler, ekipmanların ekserji kayıplarının hesaplanmasında kullanılmıştır. Ekserji kayıpları değerlendirilerek en büyük kaybın hangi ekipmanda gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ekonomik analiz sırasında ilk olarak ekipmanlar ve santralin ilk yatırım maliyetiyle bakım, işletme masrafları gibi harcamalar dikkate alınmıştır. Bu maliyetlerin

bazıları bir defaya mahsus oluşurken bazıları senelik olarak oluşabilmektedir. Farklı sıcaklıkta oluşan maliyetler seviyelendirilerek, bu maliyetlerin saatlik karşılıklarına ulaşılmıştır. Eksergoekonomik analiz için ihtiyaç duyulan diğer değerler sırasıyla yakıt, baca gazı ve yakma havası birim ekserji maliyetleridir. Yakma havasının maliyeti sıfır alınırken yakıt ve baca gazı maliyetleri hesaplanmıştır. Bu aşamaya kadar hesaplanan değerler kullanılarak akımların birim ekserji maliyeti hesaplamalarına geçilmiştir. Akımların birim ekserji maliyetlerine kazan maliyet denge denklemleriyle ulaşılmıştır. Kazan maliyet denge denklemlerinden elde edilen akımların birim ekserji maliyetleri, sistemde dolaşan buhar ve su aynı hattın ürünü olması nedeniyle bütün ekipmanlar için aynı olmuştur. Akımların birim ekserji maliyetleri hesaplanmasının ardından ekipmanlar için ayrı ayrı kayıp ekserji maliyetleri hesaplanmıştır. Eksergoekonomik analizin tamamlanması sonucunda en büyük ekserji kaybının ve en büyük kayıp ekserji maliyetinin hangi ekipmanlarda olduğu tespit edilerek bu ekipmanlar ile ilgili akımlarda farklı sıcaklık ve basınç değerleri denenerek ekserji kaybı ve maliyette oluşan değişim gözlemlenmiştir.

Yukarıda bahsedilen hesaplamalar Engineering Equation Solver programı kullanılarak yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çan, enerji, ekserji, eksergoekonomi

Exergoeconomic Analysis and Application of a Coal-Fired Thermal Power Plant

Fatih KARATAŞ

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Burhanettin ÇETİN

Inability to meet increasing energy needs with developing technology has led to studies to increase efficiency in power plants worldwide.

Due to environmental factors, machine efficiency, maximum energy that can be obtained from fuel is limited. Analysis done within these limits is called exergy analysis, when economy is included, it becomes exergoeconomic analysis. Calculations within the scope of the study started with the determination of enthalpy, entropy values of flows by using temperature, pressure values. Energy losses of equipments were obtained by using these values. Then, flows, physical, chemical exergy of stack gas, combustion air, fuel were calculated, information obtained here was used to calculate equipment exergy losses. With exergy losses calculations, it was determined in which equipment the biggest loss occurred. After exergy analysis, economic analysis was started. During economic analysis, firstly, expenses of equipment, initial investment cost of power plant, maintenance, operating costs were considered. Hourly equivalents of these costs have been obtained by leveling the costs incurred at different frequencies. Next value needed for exergoeconomic analysis is unit exergy costs of fuel, stack gas, combustion air.

While combustion air cost was taken zero, fuel, stack gas costs were calculated. Flow cost was calculated by writing the calculated values into the boiler cost equation. The flow cost value obtained from the boiler cost balance equation has been same for all equipment since steam, water circulating in system are products of same line. After flow cost calculation, lost exergy costs were calculated separately for each equipment. As a result of completion of exergoeconomic analysis, it was determined in which equipment the biggest exergy loss, the biggest loss exergy cost was, and different temperature, pressure values were tested in flows related to these equipments, and exergy loss, change in cost was observed.

The above-mentioned calculations were made using EES program.

Keywords: Can, energy, exergy, exergoeconomy

1.1 Literatür Özeti

Çağdaş yaşamının temel ihtiyaçlarından birisi de kesinlikle enerjidir. Bu durum şüphesizki gelecek içinde böyle olacaktır. Günlük yaşamın içerisinde enerjinin kullanılmadığı herhangi bir alan bulmak imkansızdır. Enerji kullanımı ülkelerin, toplumların gelişmişlik düzeylerini gösterir. İnsan hayatında ısı ve elektrik enerjisinin önemli bir yeri vardır. Enerji üretiminde doğal kaynaklarımızı kullanırken dikkatli olmalıyız ve enerji elde ederken kullandığımız makinelerin verimini yüksek tutmalıyız. Çünkü doğal kaynaklarımız sınırlıdır ve ayrıca doğal kaynaklardan enerji elde ederken bir başka söylemle enerjiyi dönüştürürken yüksek verimle dönüştürürsek kaynaklarımızı en verimli şekilde kullanmış oluruz. Enerji dönüşümünün %100 olmasını isteriz ancak bu durum çevre şartları nedeniyle mümkün değildir. Çevre şartları nedeniyle yakıtın ihtiva ettiği enerjinin kayıpsız bir şekilde mekanik yada ısı enerjisine dönüştürülememesi yakıttan elde edilebilecek maksimum enerjiyi sınırlar. Eğer çevre şartları nedeniyle ortaya çıkan sürtünme, dengesiz genişleme, iki akışkanın karışması, sonlu bir sıcaklık farkında ısı geçişi, elektrik direnci, katıların elastik olmayan şekil değişimleri gibi enerji kayıplarına sebep olan faktörler olmasaydı enerji %100 verimle dönüştürülebilirdi ve buna tersinir yani çift yönlü hal değişimi denirdi. Ancak bahsettiğim çevresel faktörler ve bunlar gibi daha bir çoğu sebebiyle enerji dönüşümü esnasında kayıplar meydana gelir ve bütün enerji dönüşümleri bu tersinmezliklerle meydana gelir. Enerji üretim sistemlerinde verimliliğimizin sınırları bu tersinmezlikler tarafından belirlenir. Burada hayatımıza kullanılabilirlik kavramı girmiştir. Bizim için niteliğin yanında nicelikte oldukça önemli olduğunu göstermiştir. Yakıtın ihtiva ettiği enerjide önemlidir ancak bu enerjinin ne kadarlık bir kısmını işe dönüştürdüğümüz başka bir ifade ile yakıtın sahip olduğu enerjinin ne kadarlık bir kısmını kullanabildiğimiz önemlidir. Kullanılabilirlik birçok kaynakta uluslararası bir kelime olması sebebiyle ekserji olarakta bilinir. Enerji tesislerinin herbir bileşeninin ayrı ayrı ekserji analizi ile sistemin yada komponentlerin herbiri için ayrı ayrı

tersinmezlik miktarları tespit edilir ve ekserji sayesinde bu veriler somut hale dönüştürülerek sistemin kaybettiği enerji komponent özelinde saptanarak iyileştirme çalışmaları yapılabilir. Benzer sistemler ekserji analizi yapılarak daha somut ve net verilerle karşılaştırılabilir. Ekserji analizindeki temel amaç tersinmezliklerin yerlerini ve miktarlarını saptayarak bu tersinmezlikleri azaltmak ve yakıttan elde edilecek olan enerji miktarını artırarak tesis verimini artırmaktır.

Enerjinin birim maliyetini etkileyen en büyük faktörlerden bir tanesi de kullanılan yakıtın birim maliyetidir. Diğer bir faktör ise tesis bileşenleridir. Enerji üretim tesisinin verimi ne kadar yüksekse aynı oranda kullanılan yakıt miktarı düşük ve üretilen enerji fazladır. Bu sayede enerjinin birim fiyatı düşer. Ekserji analizi sayesinde tersinmezliklerin yerleri tespit edilerek iyileştirme yapılması kullanılan yakıttan daha fazla enerji elde edilmesini destekler enerji birim fiyatı düşer. Bu sayede hem verimin mümkün olan en yüksek değerine ulaşılabilir hemde maliyetin mümkün olan en düşük değeri tespit edilmiş olur. Yapılan bu analiz yöntemine eksergoekonomik analiz denir.

Bu çalışmada Çan Termik Santrali için eksergoekonomik analiz yapılmıştır. Yapılan çalışmada sistemin her komponenti için ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Yapılan çalışma esnasında Engineerin Equition Solver (EES) programından faydalanılmıştır.

1.1.1 Ekserji Analizi

Açık ve kapalı sistemler için net iş kavramını kullanarak birbirine bağlı iki ayrı tanım yapılmıştır. Kapalı sistemlerin termik verimini elde edilen net işin verilen ısıya oranı olarak tanımlarken açık sistemlerin verimini ise elde edilen net işin ideal şartlarda elde edilebilecek tersinir işe oranı olduğunu vurgulamışlardır. Yapılan bu tanımları temel alarak literatürde 3 ayrı verim ifadesi olduğunun üstünde durulmuştur. Verim ifadesi en basit şekliyle sisteme girenler ve çıkanlar olduğu için, ilk verim ifadesinde sisteme yakıt ve havanın girdiğini ve egzoz gazları ile karışmış şekilde çıktığını, varsayarak tersinir işin yakıtın ekserjisi ile egzoz gazlarının farkı olarak alınmıştır. İkinci verim ifadesinde ise yine yakıt ve havanın girenler kısmında yer aldığı belirtilmiş ancak çıkanlar tarafında egzoz gazlarının karışmadığı varsayımı yapılarak tersinir işin yakıtın ekserjisi olarak alınmıştır. Üçüncü verim ifadesine ise girenler tarafında yakıt oksijen ve azot konulmuş ve çıkanlarda girenler ile egzoz

gazlarının karışmadığı kabulü yapılarak Gibbs fonksiyonu kullanılmış ve verim bu şekilde hesaplanmıştır. Bu üç verim ifadesi oldukça birbirine yakın gözüksede General Elektiriğin yaptığı çalışmalarda en gerçekçi verim ifadesinin birinci verim ifadesi olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca yapılan çalışmalarda farklı çalışma prensiplerine sahip olan sistemlerin performansının karşılaştırılmasında yakıtın ekserjisinin önemli bir rol oynadığı yapılan deneylerle de gösterilmiştir [2].

Ara kızdırmalı buhar türbini santralini modelleyip herbir elemanı için termodinamik analiz yapmışlardır. Hesaplamalar yapılırken kazan sıcaklığı ve basıncı, ara buhar miktarı ve net iş temel parametreler olarak alınmıştır. Enerji ve ekserji verim değişimleri 400-590 °C derece ve 10-15 MPa aralığında 120 farklı durum için incelenmiştir. Yapılan bu analizi Ghazla santralinden elde edilen gerçek değerle karşılaştırdıklarında değerlerin benzer olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu sayede modelin uygunluğunu tespit etmişlerdir. Bu çalışmada olmayan ise eksergoekonomik analizdir. Oluşturulan modelde sadece termodinamik analiz yerine eksergoekonomik analiz yapılsaydı ekserji verimini maksimum yapan değerlerin ve çekilen arabuharın maliyetinin nasıl değiştiği gözlemlenebilir tesis çok daha iyi şekilde iyileştirilip optimize edilebilirdi [4].

Isı ve elektrik yada ısı ve buhar üreten ara buhar almalı yada yoğuşturuculu ve karşı basınçlı çevrimlerde çalışan birleşik ısı güç santrallerinde, değişik türbin giriş halleri ve ısı yükleri için ısı ve elektrik üretimi ile çevrimdeki tersinmezlikleri göz önünde tutularak yapılan enerji ve ekserji analizi sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ara buhar almalı çevrimde elde edilen ısı gücü değişmezken, kısmi ısı yüklerinde elde edilen elektrik enerjisinin artmakta olduğu ve güç ısı oranının hızla yükselmekte olduğu gözlemlenmiştir. Karşı basınçlı birleşik güç santrallerinde ise tam ısı yükünde en yüksek ısı ve elektrik elde edildiğini belirtmiş ve komponentlerin herbiri üzerinde enerji kayıplarının tespitine yönelik yaptığı çalışmada en büyük kaybın kazanda olduğunu tespit etmiştir [3].

Ekserji analizi sayesinde bileşenlerin sistem verimine etkisinin ölçülmesinin, sistemdeki bir bileşenin saf dışı kalmasıyla sistem performansında ne gibi etkilerin oluşacağını, sistem verimini arttıracak metodların belirlenmesinin mümkün olacağını belirtmişlerdir. Sistemden çıkanların ekserjileri ile bozunumun

toplamlarının sisteme girenlerin ekserjilerine eşit olduğu ifade etmişlerdir. Ekserji verimini bütün bileşenlerin tersinmezlik faktörlerinin hesaplanıp toplanması ve bu toplamın da 1'den çıkarılması olarak tanımlamış, bunun için gerekli olan tersinmezlik faktörünü de bozunum ekserjisi ile girenlerin ekserji oranı olarak ifade etmişlerdir. Ara kızdırmalı, Rankin çevrimli buhar ve elektrik üreten bir termik santrale ekserji analizi uygulayarak sistemin ekserji verimini elde etmişlerdir. Bu verimi elde ederken kimyasal ekserjileri, kayıp ve bozunumları, ürün ekserjilerini hesaplamışlardır. Yapılan çalışmada bozunumu azaltmak için turbine giren buhar sıcaklığını arttırmak adına ilave ettikleri ara kızdırmacı, yakıtla giren ekserjiyi arttırarak sistemin ekserji veriminde azalmaya neden olmuştur. Kazandaki sıcaklık farkını azaltmanın ekserji veriminde artışı sağladığı sonucuna da bu farkı azaltmak için türbinden ara buhar çekerek besleme suyunu ısıtma yöntemini uygulayarak varmışlardır. Yaptıkları çalışma ile ekserji verimini sistemdeki bozunumları azaltarak arttırabileceklerini göstermişlerdir. Bu çalışma bir ekserji analizidir, ekonomik analiz yapılmamıştır [5].

İspanya'da bulunan 3x350 MW gücündeki buhar çevrimli Teruel termik santrali için gerçekleştirdikleri ekserji analizinde tesisin gerçek değerleri ile simulasyon oluşturmuşlardır. Yapılan çalışmada değişik yük şartlarında tesisi değerlendirip gerçek çalışma değerlerine paralel sonuçlara ulaşmışlardır. Bu çalışmada ekserji analizi herbir akış noktası için ürün-yakıt ilişkisi üzerine yapılmış olup tersinmezlik kaynakları tespit edilmiştir. Çıkardıkları sonuç tesisin çeşitli çalışma şartlarında gösterdiği davranışlarının önceden belirlenmesi ve belirlenen bu davranışlara göre önlem alınması gerektiğidir [6].

Çalışmalarını bölgesel ısıtma ve elektrik ihtiyacını karşılamakta olan rankine çevrimli bir termik santralde gerçekleştirmişlerdir. Yapılan ekserji analizi mevsimlere bağlı ısı talebine göre davranışları incelemek üzerine olup bu kapsamda bileşenlerin birinci ve ikinci kanun verimlerini hesaplamışlardır. Tesisin oldukça eski olduğunu belirtmiş ekserji açısından hangi bileşenlere odaklanılması gerektiğini tespit etmişlerdir. Bu doğrultuda iyileştirme çalışması yapmışlardır [7].

1.1.2 Eksergoekonomik Analiz

Eksergoekonomik analiz çalışmalarında maliyet hesaplarında en büyük zorluğun sistemin sınırlarının belirlenmesi olduğu belirtilmiştir. Bu duruma sebep olarak sisteme bir bütün halinde bakmanın gerçekçi bir yaklaşım olmayacağı alt sistemlere parçalandığı zaman ise bütün akışlara ait maliyet değerlerine ulaşmanın çok zor olacağı ifade edilmiştir. Bu zorluğu ikinci kanun analizi ile yenmeye çalışan araştırmacılar için ikinci kanunun bu bilgileri içermediğini ifade etmişlerdir. Kendi Yakıt – Ürün – Atık hipotezlerinin maliyet hesabı için daha gerçekçi olduğunu savunarak termodinamiğe ekserji maliyeti kavramını kazandırmışlardır. Yakıt – Ürün – Atık hipotezinde sisteme giren bütün ekserjiler yakıt olarak tanımlanırken çıkan bütün ekserjiler de ürün olarak adlandırılmıştır. Yapılan çalışmada bütün akış noktaları için giren ve çıkan ekserjileri yazarak bir matris oluşturmuşlardır. Birden çok bileşen olduğu durumda birbirini izleyenler için bir bileşenin çıktısını diğer bileşenin girdisi olarak yazarak her bir bileşene ait Yakıt – Ürün matrisini yazmışlardır. Birim ekserji maliyetinin sistemdeki akışkan aynı olduğu durumda eşit olacağını ifade etmişlerdir. Ekserji değerlerine bağlı olan birim ekserji maliyeti ifadelerini doğrusal denklem sistemi ile çözerek her bir akış noktasına ait birim ekserji maliyetlerini hesaplamışlardır. Bu sistemi Rankine çevrimi ile çalışan termik santrale uygulayarak bütün noktalara ait birim ekserji maliyetlerini de vermişlerdir. Buna ek olarak kazanı bir alt sistem haline getirerek ekserji maliyetlerini incelemiş devamında bütün santrali bir bütün olarak hesaplayarak maliyetlere ulaşmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda hesaplanan maliyetlerin birbirine çok yakın olduğunu görmüşlerdir. Maliyetlerin birbirine çok yakın olması kendi hipotezlerinin hem genel bakışta hem de bütünü alt sistemlere ayırarak yapılan detaylı incelemede kullanılabilceğini göstermiştir. Bu çalışma ekserji maliyeti kavramının ortaya atıldığı ilk çalışma olması nedeniyle önemlidir, bununla birlikte ekonomik parametrelerin gözardı edildiği genel bir yaklaşım sunmaktadır. Örneğin ekonomik parametrelerin gözardı edilmesi nedeniyle bileşenlerin yatırım, bakım ve işletme maliyetlerinin nasıl kullanılabilceği ve ürün maliyetinin bundan nasıl etkileneceği bilgisini içermemektedir [8].

Ekserji maliyeti yönteminin termoekonomik maliyetin belirlenmesinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Bu kapsamda ekserji maliyetini ve ekserji maliyeti için gerekli olan ekserji akışını iki ayrı matris olarak tanımlamışlardır. Sistem denge halinde iken, tanımlanan bu iki matrisin çarpımının sıfıra eşit olacağını belirtmişlerdir. Her akış için ekserji bozunumu yakıt ve ürün matrislerinin farkı sonucunda elde etmiş olup kaybı sıfır kabul etmişlerdir. Bu kapsamda çeşitli maliyet tanımları yapmışlardır. Buna göre termoekonomik maliyet akışın meydana gelebilmesi için gereken parasal değerken birim termoekonomik maliyet termoekonomik maliyetin birim gigajoule karşılığıdır. Birim ekserji maliyeti akışta birim ekserji üretimi maliyeti iken eksergoekonomik maliyet bir gigajoule ekserji için gerekli maliyettir. Yakıtın termoekonomik maliyeti, amortisman, işletme, bakım maliyeti ve diğer maliyetler toplamının ürünlerin termoekonomik maliyetini verdiğini belirtmişlerdir. Bunun ardından yakıt ve ürünün birim ekserji maliyetine geçmişlerdir. Bunların arasındaki farkın bileşen maliyeti ile sınırlı kalmadığını, ekserji bozunumu fonksiyonunun da farklı olduğunu ifade etmişlerdir. Bozunum maliyetinin ise yakıtın maliyeti cinsinden yazılabileceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada yapılan temel iş birim ekserji maliyetinin nasıl hesaplanabileceğine dair sunulan bir yöntemdir. Burada ekserji maliyetini düşürerek verimi artıracak iyileştirmenin nasıl yapılabileceği anlatılmamaktadır [9].

Yakıt ile ekserji bozunumu arasındaki ilişki ve ürün maliyeti, yatırım maliyeti ile ekserji bozunumu arasındaki ilişkinin belirlenmesinin termik sistem iyileştirmesi ve eksergoekonomi arasındaki ilişkinin açıklanabilmesi için gerekli olduğunu belirterek tasarruf yatırım kanununu ortaya atmışlardır. Bu kanunun yakıt maliyetini nasıl etkilediğini saptamışlardır. Bu araştırmada ekserji bozunumunun yakıtın ekserjisinden elde edilen ürünün ekserjisi çıkartıldığında elde edilen değere eşit olduğu gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında eğer yakıtın ekserji maliyeti ile ürünün ekserji maliyeti birbirine eşit kabul edilirse birim ekserji maliyetleri farkı yalnızca termoekonomik faktörlere bağlı olduğu ve yine bu kabul ile birim termoekonomik maliyet farkının ise sadece ekonomik faktörlere bağlı olduğunu göstermişlerdir. Bozunum yani boşa giden enerjinin azaltılması ile yakıttan elde edilecek enerjinin artacağını bu sayede aynı yakıttan daha fazla ürün ekserjisi elde

edilebileceğini ve bu değerin, kayıplar azaltıldığında sabitlenebileceğini belirtmişlerdir [10].

Termik santrallerin eksergoekonomik analizi esnasında ekserjiyi bileşenlerine ayırmak yerine tamamının maliyetinin hesaplamalara katılması için ek denklemlere ihtiyaç olduğunu belirtmiştir. Ekserjinin tamamının göz önüne alındığı hesaplamalarda sistemdeki ekserji dalgalanmalarının yani sisteme eklenen veya çıkarılan ekserjinin maliyete etkisinin görülmediğini belirtmiştir. Bu nedenle akış sadece akım noktalarına ait ekserjileri hesaplamak yerine tüm sistemin ekserji maliyetinin hesaplanmasının hedeflendiğini belirtmiştir. Birim ekserji maliyetini hesaplamak için her bir komponente ayrı ayrı maliyet denge denklemleri uygulanarak sistemin tamamı için maliyet denklemleri elde edilmiştir. Birim eksergoekonomik maliyet ise komponentler arasındaki etkileşimin bu denklemlerle ifade edilmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Sistemde kullanılan yakıtın ekserji maliyeti üretilen buharın ekserji maliyeti, sisteme giren ve çıkanların ekserji maliyetleri ve tesisin yada sistemin yatırım işletme bakım maliyetlerinin tamamı elde edilen işin ekserji maliyetine eşitlenmiştir. Bu yöntemin uygulandığı tesis 1 MW lık ara soğutmalı gaz türbin gruplu kojenerasyon tesisi olup, sisteme giren hava kütlesi 5kg/s hava yakıt oranı 60 olarak alınmıştır. Sistemin eksergoekonomik denge denklemleri, tesisin tüm komponentleri için ayrı ayrı yazılan eksergoekonomik dengeler neticesi hesaplanan kayıplar ve bozunumlar ile sistem için kaybın eksergoekonomik değerin birleştirilmesi sonucu oluşturulmuştur. Oluşturulan denklemlerde egzoz gazları ile kaybedilen ekserji ihmal edilerek yakıt ve komponentlerin ekserji maliyetleri toplamı, ürünlerin ekserji maliyetlerine eşitlenmiştir. Bu sayede tesise yatırım yapıldığında ve yapılmadığında tesis tam yükte yada %50 yükte çalıştığında sistemden üretilen buhar ve elektriğin ekserji maliyetini ayrıca meydana gelen mekanik, bozunum ve kayıp ekserji maliyetleride elde edilmiştir. Komponentlerin ekserji maliyetlerinin ortaya çıkmasıyla hangi komponente ne kadarlık bir iyileştirme ile maksimum kar elde edildiği ortaya çıkmış tesis bu yöntemle çok daha iyi ve efektif şekilde optimize edilme fırsatı yakalamıştır [13].

Yapılan bu çalışmada Enerji, Anerji ve Ekserji olmak üzere ikiye ayrılarak hem enerji dengesi hemde maliyet denge denklemleri yazılmıştır. Yazılan maliyet denklemlerinde ekserji ve anerjinin birim maliyetleri farklı alınmıştır. Girenlerin ekserji maliyetleri çıkanların ekserji maliyetlerine oranlanmış ve bu yöntemle bir katsayı elde edilmiştir. Anerji ve ekserji olmak üzere ikiye ayrılan enerji kavramının değerlendirmesinde enerjinin içindeki ekserji ve anerjinin birbirine dönüşmesini bu katsayının değişimi ile ifade etmişlerdir. Elde edilen katsayı sıfır ile bir arasında olması durumunda sistemde anerjinin kullanabileceğini ifade etmektedir. Katsayının sıfıra eşit olduğu durumda ise denklemin ekserji maliyet denklemine dönüştüğünü, bire eşit olması durumunda denklemin enerji maliyet denklemi haline dönüştüğünü ve katsayının sıfırdan küçük olduğunda anerjinin kullanılamayacağını göstermiştir. Eğer katsayı sıfırdan küçükse anerjinin atık veya sistemden çevreye atılan entropi olduğunu vurgulamıştır. Enerji politikalarının sabitin belirlenmesinde etkili olduğu vurgulanarak Valero'nun geliştirmiş olduğu ekserji maliyetine uyum gösterir şekilde ekserji maliyeti hesaplaması yapılmıştır. Yöntemlerin kojenerasyon gibi tesislerde de uygulanabileceği belirtilmiştir [18].

Bu çalışmada ilk basamağı analiz ikinci basamağı dizayn olmak üzere iki basamaktan oluşan yöntem geliştirilmiş ve bu yöntem sayesinde termik sistemlere ekserji analizi uygulayarak optimizasyon çalışması yürütül müştür. Bu yöntem sistemin ekserji verimi ile ürünlerin ekserji verimleri arasında bağ kurulmasına destek vermiş ve bu sayede sistemdeki ekserji kayıplarının nerelerde olduğu tespit edilebileceği, komponentlerin ekserji verimleri ve system gücüne etkileri hakkında detaylı bilgi edinilebileceği belirtilmiştir. Ekserji verimini hesaplarken yapılan yaklaşımın neticesinde gerçeklik payını artıracak olan zorunlu ekserji kayıplarını dikkate alındığını vurgulayarak sistemde uygulanan ekonomik analizde bu yöntemin doğruluk payının çok yüksek olduğu gösterilmiştir. Kömür yakıtlı kombine çevrim santrallerine uygulanan bu analiz ile santralin verimi düşüren kısımları tespit edilmiş bu kısımlara yönelik optimizasyon çalışmaları yapılmış ve modifiye edilmiş iyileştirilmiş tesis ile ilk tesis yıllık çalışma şartlarına bağlı olarak karlılık açısından karşılaştırılmıştır. Çalışma yürütülen santral için toplan net güç 281.3MW, verim %45.02, kompresör basınç oranı 11.65 olduğu tespit edilmiştir. Sistemde ekserji kayıplarını düşürmek için tesise hava ön ısıtıcısı eklenerek ve

buharda ara kızdırma yapılarak tesisin ekserji vermi artırılarak iyileştirilebileceği belirtilmiştir. Tesis termodinamik ve ekonomik açıdan optimum güç verim değerleri hesaplandığında bu değerlerin sırasıyla basınç oranı 12.87, güç 313.9 MW, verim %50.23 iken ekonomik optimum değerleri basınç oranı 6.59, güç 311.5 MW verim %49.85 olarak tespit etmişlerdir. Bu tesiste, yapılan optimizasyon çalışmalarının neticesi ortaya çıkan yeni dizaynın tesise uygulanması durumunda tesisten elde edilebilecek yıllık karın 13.5 milyon dolar artacağı tespit edilmiştir [19].

Çalışmada termik tesis dizaynında rekabet ortamı düşünüldüğünde performans yüksekliğinin tek başına yeterli olmadığına bunun yanında ilk yatırım maliyetinde olabildiğince düşük olması gerektiğini vurgulamış bu nedenle tesis dizaynında ekonomikliği ön plana çıkartarak optimizasyon ve termoekonomikliğin önemini belirtmiştir. Bu çalışmada ayrıca termik sistemlerin dizaynında veya mevcut sistemlerin optimize edilmesi için farklı bilgisayar programları yazılmıştır. ESMS programı, Nuovo Pignone Kombine Çevrim Santrali'nin modeline ait performans değerlerini bulmak için, Ropac programı, optimum çalışma şartlarını tespit etmek için ve Opti programı ekonomik açıklamalar için yazılmış ve kullanılmıştır. Çalışmada termik sistemlerin dizaynında yada mevcut sistemlerin optimizasyonunda kullanılmak üzere oluşturulan modelde yatırım, işletme ve bakım maliyetleri santralin termodinamik ve geometrik parametrelerinin fonksiyonu olarak yazılmıştır. Ürün satışından elde edilen gelir ve santralin tüm ekipmanlarının maliyeti, işletme bakım maliyetleri, personel giderleri sigorta maliyetleri bir fonksiyon olarak yazılmıştır. Tüm bu fonksiyonlarla yatırım maliyetinin bir değere getirilme miktarının farkı alınarak birim ürün maliyete ortaya çıkarılmıştır. Hesaplamalar neticesinde komponentlerin maliyetlerinin tesis yatırım maliyeti içerisinde önemli bir değere sahip olduğunun matematiksel verilerle ispatlanması, ortaya çıkması sonucu komponentlerin düşük maliyetli olması gereği vurgulanmıştır. Ara kızdırma basıncı, atık ısı kazanındaki yüksek basınç ve düşük basınç pinch noktaları dikkate alınarak komponent maliyetleri hesaplanmış ve bir tablo halinde verilmiştir. Yapılan hesaplamalarda buhar ve gaz tarafı sıcaklık değerleri ile ilgili ortaya çıkan değerlerin Nuovo Pignone santralinin değerleri ile oldukça yakınlık göstermesi tasarlanan modelin gerçekçiliğini artırmış ve bu modelin çok kısa sürede gerçek santrallerin analize imkan verdiği

görülmüştür. Bu çalışmada birim ürün maliyeti gaz türbinine ait kütleli debi, güç/ısı oranı, basınç oranı, buhar tarafına ait güç buhar alçak ve yüksek basınçları sabit alınarak ve değişik şartların incelenmesi neticesi hesaplanmış ve Nuova Pignone Santrali ile karşılaştırılmıştır. Sistemde üretilen tek ürün elektrik olması sebebiyle model tüm combine çevrim santralleri için genel bir model değildir. Oluşturulan modelin en büyük eksik tarafı ekserji ve eksergoekonomi yönünden hiçbir inceleme yapılmamasıdır. Bu yönüyle modeled yapılan termodinamik analiz yetersiz kalmaktadır [14].

Termik sistemlerde yapılan termoekonomik analizde enerji kaybı miktarının düşürülüp düşürülemeyeceği bir başka deyişle kaybedilen ekserjiyi azaltmaya yönelik çalışma yürütülmüştür. Özellikle ekserji kaybının bir başka deyişle ekserji bzonumunun kojenerasyon tesis komponentlerinin yatırım maliyetine etkisi üzerinde durulmuştur. Ekserji verimi elde edilen ürünün ekserjisini yakıtın ekserjisine oranlanarak tespit edilmiştir. Ürünün ekserjisi ile kayıp ekserjinin toplamı yakıtın ekserjisine eşitlenerek kayıp ekserjinin tesis veriminde ne büyük bir rolünün olduğu vurgulanmıştır. Ekserji kaybı geri kazanılabilir ve kazanılamaz olarak tanımlanmıştır. Ürünün birim ekserji maliyeti, yatırım maliyeti, geri kazanılabilir veya kazanılamaz kayıp ekserji maliyeti miktarı arasındaki bağlantıyı, ürün birim ekserji maliyetinin, yakıtın ekserji maliyeti ile yatırım maliyeti toplamının ürünün ekserjisine oranı olacağını ve ürünün ekserjisi yerine yakıtın ekserjisi ile bozunum farkı yazılmasıyla elde edileceğini belirtmişlerdir. Ekserji kaybının geri kazanılabilir kısmının yatırım maliyetlerinin artırılması ile arttığını ancak bunun artan maliyet ve geri kazanılan ekserjinin karşılaştırılıp optimize edilmesi gerektiğini yazmışlardır [15].

1.2 Tezin Amacı

Bir termik santralde termodinamiğin ikinci yasasının analizi çerçevesinde, santralin tüm birimlerinin ayrı ayrı ekserji ve ekonomi analizini yaparak daha verimli çalışabileceği noktaların belirlenmesi ve bu sayede enerji tasarrufu sağlayarak bir taraftan santralin çevreye olan zararını azaltırken, diğer yandan da enerji birim fiyatını düşürmek.

1.3 Hipotez

Bu çalışmanın hipotezi:

Bir termik santral üzerinde yapılacak iyileştirme için seçilecek ekipmanın belirlenmesinde ekserji analizi sonuçları ile eksergoekonomik analizin sonuçları sıralama veya değer büyüklüğü oranları açısından farklılık gösterebilmektedir.

1.4 Tezin Kapsamı

Çan Termik Santrali ekipmanları üzerinde çalışma yapılmıştır. Bu santral 1 adet buhar kazanı, 1 adet yüksek basınç türbini, 1 adet orta basınç türbini, 1 adet alçak basınç türbini, 1 adet kondenser, 1 adet kondenser tahliye pompası, 4 adet alçak basınç besleme suyu ısıtıcısı, 1 adet degazör, 1 adet kazan besleme pompası ve 2 adet yüksek basınç besleme suyu ısıtıcısından oluşmaktadır. Termik santralde yer alan bu ekipmanların hepsi eksergoekonomik analize dâhil edilmiştir.

1.5 Tezin Yöntemi

Bu çalışmada bir termik santral üzerinde eksergoekonomik analiz yapılmıştır. Enerji dönüşüm sisteminde her bir bileşen için ayrı ayrı ekserji analizi yapılır. Yapılan bu analizler kaydedilir ve böylece topluca sistemin ekserji analizi yapılmış olur. Sistemde yapılan ekserji analizinde elde edilen verilerin maliyetle ilişkilendirilmesi ile yapılan analize ise Eksergoekonomik analiz denir. İlk basamakta termodinamiğin ikinci yasasının analizi diğer bir deyişle enerjinin niteliği yanında niceliğinin yani kullanılabilirliğini ön plana çıkaran ekserji analizi yapılmıştır. İkinci basamakta ise sistem ekipmanları seviyesinde ekonomik analiz yapılmıştır.

TERMODİNAMİK KORELASYON VE YASALAR

Termodinamik, enerjinin bilimi olarak tanımlanabilir. Enerjinin ne olduğu hakkında herkesin bir görüşü olmakla birlikte tam olarak bir tanımını yapmak zordur. Enerji, değişikliklere yol açan etken olarak düşünülebilir.

Termodinamik sözcüğü Latince Therme (ısı) ve dynamis (güç) sözcüklerinden türemiştir ve eski zamanlardan beri süre gelen ısıyı işe dönüştürme çabalarının uygun bir tanımlaması olmaktadır. Günümüzde bu ad, enerji ve enerji dönüşümlerinin tüm yönlerini kapsayan bir anlam taşımaktadır. Termodinamiğin uygulama alanları arasında güç (elektrik) üretimi, soğutma, maddenin özellikleri arasındaki ilişkiler ve benzerleri sayılabilir.

Doğanın en temel yasalarından biri enerjinin korunumu ilkesidir. Bu yasa, bir etkileşim sırasında enerjinin bir biçimden başka bir biçime dönüşebileceğini, fakat toplam miktarının sabit kalacağını belirtir. Başka bir deyişle enerji yaratılamaz veya yok edilemez.

Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin korunumu ilkesini ifade eder ve enerjinin termodinamikle ilgili bir özellik olduğunu vurgular.

Termodinamiğin ikinci yasası, enerjinin niceliğinin (miktarının) yanında niteliğinde dikkate alınması gerektiğini ortaya koyar ve doğadaki değişimlerin enerjinin niteliğini azaltan yönde gerçekleştiğini belirtir.

2.1 Termodinamiğin Birinci Yasası

Termodinamiğin 1. Yasası gereği enerji var yada yok edilemez ancak bir biçimden başka biçime dönüştürülebilir. Bu kural enerjinin korunumunu ifade eder.

2.2 Termodinamiğin İkinci Yasası

Birinci yasanın hal değişimi olup olmayacağı konusundaki yetersizliği sebebiyle termodinamiğin ikinci yasası devreye girmiştir. İkinci yasa enerjinin niceliği yanında niteliğini ön plana çıkarmıştır. Enerjinin rakamlarla ifade edilen büyüklüğü yanında iş yapabilme kabiliyeti yani kullanılabilirliğini göz önüne alan bu yasa sayesinde makinelerin çalışma prensipleri daha iyi anlaşılabilir ve verimlilik hesaplamaları rahatlıkla yapılabilmektedir.

2.3 Termodinamiğin 1. ve 2. Yasası ile Kelvin Plank ve Clausius İfadeleri

Termodinamiğin ikinci yasasına göre hal değişimleri rastgele bir yönde değil de belirli bir yönde gerçekleşir. Termodinamiğin 1. ve 2. Yasalarına ters düşen bir hal değişimi doğada mümkün değildir. İş direkt olarak ısıya dönüştürülebilirken ısı bir ısı makinesi kullanılmadan işe dönüştürülemez. Isı makinesinin Isıl verimi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net,çıkan}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (2.1)$$

Burada $W_{net,çıkan}$: Isı makinesinin Yaptığı Net İş

Q_H : Makineye Verilen Isı

Q_L : Makinenin Çevreye Verdiği Isı olmaktadır.

Termodinamiğin 2. Yasasının Kelvin Plank ifadesi şunu belirtir: Doğada hiçbir ısı makinesi başka hiçbir etkileşimde bulunmadan bir ısı deposu ile etkileşimde bulunarak net iş üretmez. Buna benzer olarak ikinci yasanın Clausius ifadesinde bir makinenin başka hiçbir etkileşimde bulunmadan soğuk bir cisimden sıcak bir cisme enerji akatamayacağı yönündedir. Bu iki ifadeye bakıldığında ikiside aynı durumu ifade etmektedir.

ENERJİ VE EKSERJİ KAVRAMI

3.1 Enerji Kavramı

Enerji bir sistemin iş yapabilme kapasitesidir. Enerji kendini elektrik, nükleer, manyetik mekanik gibi farklı türlerde gösterebilir. Sistemin yada cismin belli bir referans noktaya göre hareketinden dolayı sahip olduğu enerjiye kinetik enerji denir. Kinetik enerji KE ile sembolize edilir.

$$KE = \frac{mV^2}{2} \text{ (kj)} \quad (3.1)$$

Kinetik enerji denklemindeki “V” sembolü stabil bir referans noktasına göre sistemin hızını ifade etmektedir.

Sistemin veya cismin yerçekiminden dolayı yüksekliğe bağlı olarak sahip olduğu enerjiye potansiyel enerji denir ve “PE” ile sembolize edilir. Formülü aşağıdaki gibidir.

$$PE = mgz \quad (3.2)$$

Molekülün atomlar arası bağlarının oluşturduğu enerjiye iç enerji denir ve U harfi ile sembolize edilir.

Tanımları ile birlikte belirttiğim enerjilerin toplamı aşağıda da formulize edildiği gibi toplam enerjiyi oluşturur.

$$E_{sistem} = U + KE + PE \quad (3.3)$$

3.2 Ekserji Kavramı ve Analizi

Termodinamiğin 1. Kanunu gereği enerji var edilemez ya da yok edilemez olduğu ve ayrıca Termodinamiğin 2. Yasası gereği enerjinin niceliği yanında niteliğininde öneme sahip olduğu önceki paragraflarda belirtilmiştir. Tüm bu bilgiler ışığında ise yeni bir enerji kaynağı bulunduğu ilk yapılan enerjinin miktarını belirlemektir. Bu bilgi burada bir güç santrali yapmak için ya da enerjinin değerlendirilmesi için tesis kurmak için yeterli değildir. Enerjinin miktarı fizibilite çalışması için ne kadar önemliyse bu enerjinin iş yapabilme kapasitesi başka bir söylemle enerjinin iş potansiyelide miktarı kadar önemlidir. Enerjinin ne kadarlık bir kısmı jeneratörü çevirmek için kullanılacak veya ne kadarı tesis için kullanılabilir asıl önemli olan budur. Kullanılmayan enerji atık ısı olarak çevreye verilecektir. Bunun tesis için bir önemi yoktur. Belirli bir miktardaki enerjinin ne kadarının işe dönüştürülebileceğini tanımlayan özelliğe ekserji denir. Bu kavram enerji dönüşümlerinde oldukça büyük önem arz etmektedir.

3.2.1 Ekserji Bozunumu İlkesi ve Ekserji Yok Oluşu

Ayrık bir sistemi düşünelim. Tanım olarak, ayrık bir sistemin sınırlarından ısı, iş veya kütle geçişi olmaz ve bu yüzden enerji veya entropi geçişi yoktur. Öyleyse, ayrık bir sistem için enerji ve entropi dengesi aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir.

$$\text{Enerji Dengesi} : E_{giren} - E_{çıkan} = \Delta E_{sistem} \rightarrow 0 = E_2 - E_1 \quad (3.4)$$

$$\text{Entropi Dengesi} : S_{giren} - S_{çıkan} + S_{üretim} = \Delta S_{sistem} \rightarrow S_{üretim} = S_2 - S_1 \quad (3.5)$$

İkinci bağıntıyı T_0 ile çarpıp birinci bağıntıdan çıkarttığımızda aşağıda verilen eşitlik elde edilir.

$$-T_0 S_{üretim} = E_2 - E_1 - T_0(S_2 - S_1) \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} X_2 - X_1 &= (E_2 - E_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) \\ &= (E_2 - E_1) - T_0(S_2 - S_1) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Çünkü ayrık bir sistem için $V_2 = V_1$ yazılabilir. (Herhangi bir hareketli sınır ve bu nedenlerle herhangi bir sınır işi içermez.) 3.7 ve 3.8 numaralı eşitlikler birleştirildiğinde aşağıdaki verilen eşitlik elde edilir.

$$-T_0 S_{\text{üretim}} = X_2 - X_1 \leq 0 \quad (3.8)$$

T_0 çevrenin mutlak sıcaklığı olduğundan ve bu yüzden pozitif nicelik olan $S_{\text{üretim}} \geq 0$ olduğundan dolayı $T_0 S_{\text{üretim}} \geq 0$ yazılır. Öyle ise aşağıda verilen sonuca ulaşılabilir.

$$\Delta X_{\text{ayrık}} = (X_2 - X_1)_{\text{ayrık}} \leq 0 \quad (3.9)$$

Bu eşitlik, bir hal değişimi boyunca ayrık bir sistemin ekserjisi her zaman azalır veya sınırlı bir durum olan tersinir bir hal değişiminde sabit kalır; şeklinde ifade edilebilir. Başka bir deyişle, ekserji asla artmaz ve gerçek bir hal değişimi sırasında yok olur. Bu ekserjinin azalması ilkesi olarak bilinir. Ayrık bir sistem için ekserjideki azalma ekserji yok oluşuna eşittir.

Ekserji Yok Oluşu

Sürtünme, karışım, kimyasal tepkimeler, sonlu bir sıcaklık farkı aracılığı ile ısı geçişi serbest genişleme, sanki-dengeli olmayan sıkıştırma veya genişleme gibi tersinmezlikler daima entropi üretir ve entropi üreten herhangi bir şey ekserjiyi yok eder. Ekserji yok oluşu, 3-9 numaralı eşitlikten de görüleceği gibi entropi üretimi ilede orantılıdır ve aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir:

$$X_{\text{yok olan}} = T_0 S_{\text{üretim}} \geq 0 \quad (3.10)$$

Yok olan ekserjinin, herhangi bir gerçek hal değişimi için pozitif bir nicelik olduğuna ve tersinir bir hal değişimi için sıfır olduğuna dikkat edilmelidir. Yok olan ekserji, kaybedilen iş potansiyelini temsil eder ve buna aynı zamanda tersinmezlik veya kayıp işte denir.

Ekserji azalması ve ekserji yok oluşunu temsil eden 3.10 ve 3.11 numaralı eşitlikler, sistemin herhangi bir türünde gerçekleşen hal değişiminin herhangi bir türüne

uygulanır. Çünkü herhangi bir sistem ve çevresi, içerisinde ısı, iş ve kütle geçişi olmayan yeterince büyük bir sınır tarafından çevrilmiş olabilir ve bu nedenle herhangi bir sistem ve onun çevresi ayrı bir sistem oluşturabilir.

Gerçek hal değişimlerinin hiçbiri tamamen tersinir değildir ve bu yüzden hal değişimi sırasında bir miktar ekserji yok olur. Bu nedenle, ayrı bir sistem olarak kabul edilebilecek olan evrenin ekserjisi sürekli olarak azalmaktadır. Hal değişimi ne kadar tersinmez olursa, hal değişimi esnasındaki ekserji yok oluşuda o kadar büyük olur. Tersinir bir hal değişimi sırasında ise ekserji yok olmaz. ($X_{yok\ olan, tr} = 0$)

Ekserjinin azalması ilkesi, bir sistemin ekserjisinin artamayacağı anlamına gelmez. Bir sistemin ekserji değişimi, hal değişimi sırasında pozitif veya negatif olabilir. Ancak ekserji yok oluşu negatif olamaz. Ekserjinin azalması ilkesi aşağıda verildiği gibi özetlenebilir:

$X_{yok\ olan} > 0$ ise Tersinmez Hal Değişimi

$X_{yok\ olan} = 0$ ise Tersinir Hal Değişimi

$X_{yok\ olan} < 0$ ise Olanaksız hal değişimi

Bu ilişki, bir hal değişiminin tersinir, tersinmez veya olanaksız olup olmadığını belirlemek için seçimlik bir ölçüt olarak görülebilir [1].

Ekserji Dengesi: Kapalı Sistemler

Ekserjinin doğası, ekserjinin yok edilebilir ama yaratılamaz olması bakımından entropinin doğasının tersidir. Bu yüzden, bir hal değişimi süresince bir sistemin ekserji değişimi sistem sınırlarındaki hal değişimi süresince yok olan ekserjiye eşit miktardaki bir ekserji geçişinden daha azdır. Öyleyse ekserjinin azalması ilkesi aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

(Toplam Ekserji Girişi) – (Toplam Ekserji Çıkışı) – (Toplam Ekserji Yok Oluşu)
= (Sistemin Toplam Ekserjisindeki Değişim)

veya aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir:

$$X_{giren} - X_{çıkan} - X_{yok olan} = \Delta X_{sistem} \quad (3.11)$$

Bu ilişkiye ekserji dengesi denir ve bir hal değişimi sırasında sistemin ekserji değişimi, sistemin sınırından olan net ekserji geçişi ile tersinmezlik arasındaki fark olarak ifade edilebilir.

Ekserjinin ısı, iş ve kütle geçişi ile bir sisteme veya bir sistemden dışarı geçebileceğini daha önce belirtmiştik. Öyle ise, herhangi bir hal değişimine uğrayan herhangi bir sistemin ekserji dengesi, daha açık bir biçimde aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir:

$$\text{Genel: } X_{giren} - X_{çıkan} - X_{yok olan} = \Delta X_{sistem} \text{ (kJ)} \quad (3.12)$$

Burada $X_{giren} - X_{çıkan}$ ısı iş ve kütle ile net ekserji geçişini $X_{yok olan}$ ekserji yok oluşunu ve ΔX_{sistem} ise ekserjideki değişimi ifade eder.

Birim zaman için aşağıda verildiği gibi yazılabilir:

$$\text{Genel akım biçimi: } \dot{X}_{giren} - \dot{X}_{çıkan} - \dot{X}_{yok olan} = dX_{sistem}/dt \text{ (kw)} \quad (3.13)$$

Burada $\dot{X}_{giren} - \dot{X}_{çıkan}$ eşitliği ısı iş kütle ile net ekserji geçişi akımını $\dot{X}_{yok olan}$ ifadesi ekserji yok oluşu akımını ve dX_{sistem}/dt ise ekserjideki değişim değerini ifade etmektedir.

Burada ısı, iş ve kütle tarafından yapılan ekserji geçişi akımları sırasıyla, $\dot{X}_{ısı} = (1 - T_0/T)\dot{Q}$ $\dot{X}_{iş} = \dot{W}_{yararlı}$ $\dot{X}_{kütle} = \dot{Q}\psi$ olarak yazılabilir. Ekserji dengesi, birim kütle cinsinden aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir:

$$\text{Genel Birim Kütle İçin : } (x_{giren} - x_{çıkan}) - x_{yok olan} = \Delta x_{sistem} \left(\frac{kJ}{kg}\right) \quad (3.14)$$

Burada niceliklerin tümü sistemin birim kütlesi için ifade edilmiştir. Tersinir bir hal değişimi için, ekserji yok oluşu terimi $X_{yok olan}$, yukarıdaki tüm eşitliklerden çıkartılır. Aynı zamanda, ilk önce entropi üretimi ($S_{üretim}$) ve daha sonra ekserji yok oluşunu doğrudan doğruya 3-11 numaralı eşitlikten bulmak daha elverişlidir. Yani,

$$X_{yok olan} = T_0 \dot{S}_{\dot{u}retim} \text{ veya } \dot{X}_{yok olan} = T_0 \dot{S}_{\dot{u}retim} \quad (3.15)$$

Çevre koşulları P_0 ve T_0 ve sistemin son durumu belirli olduktan sonra sistemin ekserji değişimi $\Delta X_{sistem} = X_2 - X_1$, hal değişiminin nasıl gerçekleştiğine bakılmaksızın doğrudan 3.17 numaralı eşitlikten belirlenebilir. Bununla birlikte ısı, iş ve kütle geçişi yoluyla ekserji geçişinin belirlenmesi, bu etkileşimler hakkında bilgi gerektirir.

$$\begin{aligned} \Delta X &= X_2 - X_1 = m(\phi_2 - \phi_1) = (E_2 - E_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) \\ &= (U_2 - U_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) + m \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + mg(z_2 - z_1) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Kapalı bir sistem herhangi bir kütle akışı ve bu nedenle herhangi bir ekserji geçişi içermez. Isı geçişinin pozitif yönü, sisteme doğru olacak şekilde ve iş geçişinin pozitif yönü sistemden dışarı doğru olacak şekilde alındığında, kapalı bir sistemin ekserji dengesi, daha açık bir biçimde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\text{Kapalı Sistem:} \quad X_{isl} - W_{i\dot{s}} - X_{yok olan} = \Delta X_{sistem} \quad (3.17)$$

Veya

$$\text{Kapalı Sistem:} \quad \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) Q_k - (W - P_0(V_2 - V_1)) - T_0 \dot{S}_{\dot{u}retim} = X_2 - X_1 \quad (3.18)$$

burada k konumunda, T_k sıcaklığındaki sınırdan geçen ısı Q_k 'dir. Yukarıdaki eşitlik Δ_t zaman aralığına bölünüp limiti $\Delta_t \rightarrow 0$ şeklinde alındığında kapalı bir sistem için ekserji dengesinin birim zaman için yazılan şekli aşağıda verildiği gibi elde edilir:

$$\text{Birim zaman:} \quad \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \left(\dot{W} - P_0 \left(\frac{dV_{sistem}}{dt}\right)\right) - T_0 \dot{S}_{\dot{u}retim} = \frac{dX_{sistem}}{dt} \quad (3.19)$$

Kapalı bir sistem için yukarıda verilen bağıntılar bir sisteme doğru olan ısı geçişini ve sistem tarafından yapılan işi pozitif nicelikler olarak almak süreti ile geliştirilmiştir. Bu nedenle bu bağıntıları kullanırken sistemden olan ısı geçişi ve sisteme yapılan iş

negative nicelikler olarak alınacaktır. Yukarıda verilen ekserji dengesi ilişkileri ekserji yok oluşu terimini sifra eşitleyerek tersinir işi (W_{tr}) belirlemek için kullanılabilir. Bu durumda W işi tersinir iş olacaktır. Yani, $X_{yok\ olan} = T_0 S_{\text{üretim}} = 0$ olduğu zaman $W = W_{tr}$ olur.

$X_{yok\ olan}$ teriminin dış tersinmezlikler sonucunda sistem sınırları dışında meydana gelebilecek ekserji yok oluşunu değil, yalnızca sistem sınırları içerisinde yok olan ekserjiyi temsil ettiğine dikkat edilmelidir. Bu nedenle, $X_{yok\ olan} = 0$ olan bir hal değişimi içten tersinirdir ama tamamen tersinir olmasında gerekmez. Bir hal değişimi sırasındaki toplam ekserji yok oluşu ekserji dengesini, sistemin kendisini ve dış tersinmezliklerin oluşabileceği yakın çevresini içeren genişletilmiş bir sisteme uygulamak suretiyle belirlenebilir [1].

Sürekli Akışlı Sistemler İçin Ekserji Dengesi

Uygulamada karşılaşılan türbinler, kompresörler, lüleler, yayıcılar, ısı değiştiriciler, borular ve kanallar gibi kontrol hacimlerinin çoğu sürekli olarak çalışır ve böylece hacimlerinde olduğu gibi kütlelerinde enerjilerinde, entropilerinde ve ekserji içeriklerinde hiçbir değişikliğe uğramazlar. Bu nedenle bu tür sistemler için $dV_{KH}/dt = 0$ ve $dX_{KH}/dt = 0$ yazılabilir ve bir sürekli akışlı sistemin tüm biçimlerinde (ısı, iş ve kütle geçişi) giren ekserji akımı, sistemi terkeden ekserji akımı artı yok olan ekserji miktarına eşit olmalıdır. Öyleyse birim zaman için genel ekserji dengesi sürekli akış işleminde aşağıda verilen eşitliğe indirgenir:

$$\text{Sürekli akış: } \sum (1 - \frac{T_0}{T_k}) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum_g \dot{m} \psi - \sum_c \dot{m} \psi - \dot{X}_{yok\ olan} = 0 \quad (3.20)$$

Tek akımlı (bir giriş, bir çıkış) sürekli akış düzeneği için, yukarıda verilen bağıntı aşağıda verilen biçime indirgenir:

$$\text{Tek Takım: } \sum (1 - \frac{T_0}{T_k}) \dot{Q}_k - \dot{W} + \dot{m} (\psi_2 - \psi_1) - \dot{X}_{yok\ olan} = 0 \quad (3.21)$$

Yukarıda verilen \dot{m} , kütleli debidir akış ekserjisindeki değişme aşağıda verildiği gibi yazılabilir :

$$\psi_2 - \psi_1 = (h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad (3.22)$$

3.21 numaralı ekserji dengesi eşitliği \dot{m} değerine bölünerek birim kütle için aşağıda verilen eşitlik elde edilir:

$$\sum (1 - \frac{T_0}{T_k}) \dot{q}_k - \dot{w} + (\psi_1 - \psi_2) - x_{yok olan} = 0 \quad (3.23)$$

Yukarıda verilen $q = \dot{Q}/\dot{m}$ ve $w = \dot{W}/\dot{m}$ sırasıyla, akışkanın birim kütlesi için ısı geçişi ve yapılan iştir.

İş etkileşimi olmayan tek akımlı bir adyabatik durum için, ekserji dengesi bağıntısı dahada basitleştirilerek $\dot{X}_{yok olan} = \dot{m}(\psi_1 - \psi_2)$ elde edilir ve sıvının özgül ekserjisinin, iş üretmeyen adyabatik bir düzeneden geçerken azalması gerektiğini veya tersinir bir sınırlı hal değişimi durumunda sıvının özelliklerine bakmaksızın aynı kaldığını ($\psi_2 = \psi_1$) göstermektedir [1].

Tersinir İş W_{tr}

Yukarıda verilen ekserji dengesi bağıntıları ekserji yok oluşu sıfıra eşitlenerek tersinir işi (W_{tr}) belirlemek için kullanılabilir. Bu durumda "W" işi, tersinir iş haline gelir. Yani,

$$\text{Genel: } X_{yok olan} = 0 \text{ olduğunda } W = W_{tr} \quad (3.24)$$

Örneğin tek akımlı sürekli akış düzeneği için tersinir güç, aşağıda verildiği gibi yazılabilir:

$$\text{Tek akım: } \dot{W}_{tr} = \dot{m}(\psi_1 - \psi_2) + \sum (1 - \frac{T_0}{T_k}) \dot{Q}_k \quad (3.25)$$

Adyabatik bir düzener için aşağıda verilen hale indirgenir:

$$\text{Adyabatik Tek Akım } \dot{W}_{tr} = \dot{m}(\psi_1 - \psi_2) \quad (3.26)$$

Ekserji yok oluşunun, sadece tersinir bir hal değişimi için sıfır olduğuna tersinir işin türbinler gibi iş üreten düzenekler için en fazla iş çıktısını ve kompresörler gibi iş tüketen düzenekler için en az iş çıktısını temsil ettiğine dikkat edilmelidir.

Niceliğe Karşı Nitelik Enerjinin Kullanılabilirliği, İş Yapabilme Yeteneği

Gündelik yaşamda kullanılan enerji, başka bir enerji kaynağından dönüşümle elde edilir ve ikincil enerji olarak adlandırılır. Isı elektrik, mekanik gibi çeşitli formlarda olan enerjinin birincil kaynağından daha değerli olan ikincil kaynaklara dönüştürülmesi için kullanılan sistemler ise enerji üretim sistemleri olarak bilinirler. Bu sistemlerin çalışmasında termodinamik şartlar, kanunlar göz önüne alınır. Bu enerji dönüşüm makinaları termodinamiğin 1. ve 2. Kanun ifadeleri prensiplerine göre çalışır.

Enerjinin korunması demek enerjiden tasarruf etmek ve kaynakların daha verimli kullanılması demektir. Bu sayede daha temiz bir çevrede yaşanır ve ekonomiye katkı sağlanır. Enerji her zaman dönüşür dönüştürülür. Enerji harcamanın anlamı aslında enerjinin daha az yararlı bir biçime dönüştürülmesi demektir. İşe dönüştürülebilen ya da dönüştürülebilecek enerji, enerji mühendisleri için önem arz eder. Enerjinin kullanılabilirliği yani niceliği, enerjinin miktarı yani niteliği yanında çok daha önemlidir. Kullanılmayan sonsuz büyüklükteki enerji mühendisler için anlam ifade etmez. Ancak yinede enerji değerlendirilirken niceliği yanında niteliğide göz önüne alınmaması halinde alınacak kararlar ve uygulanacak eylem planı hatalı olabilir. Bu durumda Mühendisler tarafından Termodinamiğin 1. ve 2. yasası birlikte göz önüne alınmalı ve değerlendirilmelidir.

Termodinamiğin 1. Kanunu özetle enerjinin dönüşebileceğini, sistemler arasında transfer edilebileceğini ancak bu dönüşümler ve transferler esnasında toplamının mutlaka sabit kalacağını ifade eder [16].

Termodinamiğin ikinci kanunu, bazı enerji dönüşümleri için sadece sistemden çıkan enerjinin iş potansiyelinin sisteme giren enerjisinin iş potansiyelinden daha küçük

olduğunu ifade etmekle yetinmektedir. Aradaki iş potansiyel farkı, söz konusu dönüşümde meydana gelen tersinmezliklere bağlıdır. Bu tersinmezlikler ortadan kaldırılabiliyorsa, yani enerji dönüşümü tersinir bir şekilde gerçekleşirse, sisteme giren ve çıkan enerjilerin iş potansiyelleri birbirine eşit olur. Ayrıca termodinamiğin 2. Kanunu ısı enerjisinin sadece belirli bir kısmının işe çevrilebileceğini, çevrenin iç enerjisinden yararlanarak iş elde edilemeyeceğini belirterek, enerji dönüşümlerini sınırlamakta ve bütün doğal olayların tersinmez zolduğuna dikkati çekerek enerjinin bir şekilden diğer bir şekle her dönüşümünde veya bir sistemden diğer sisteme transferinde, insanların faydalanabilecekleri kısmının azalacağını ve bu nedenle sürekli olarak değer kaybedeceğini ifade etmektedir. Bu kanun ışın, ısı veya iç enerjiye dönüşümü için herhangi bir kısıt önermezken, iç enerjinin tam olarak işe dönüştürülemeyeceğini ifade etmektedir. Bunların tersinir bir süreçle işe dönüştürülebilecek maksimum miktarları için bir üst sınır belirlenmelidir [16].

Eğer bir enerji belirlenmiş bir ortamda diğer tüm enerji türlerine dönüştürülebiliyorsa bu enerjiye kullanılabilir enerji veya ekserji denir. Eğer bu enerji diğer enerji türlerine dönüştürülemiyorsa bu enerji kullanılamaz enerji veya anerji denir. Eğer enerji belirlenmiş ortamda tam bir dönüşüm geçiremiyor bir miktarı dönüştürülebiliyorsa, buna sınırlı miktarda dönüştürülen enerji denir ve bu enerji ekserji ve anerjinin toplamından oluşmaktadır [16].

4.1 Çan Termik Santrali

Çan ilçesi linyit rezervleri açısından oldukça önemlidir. İçeriğindeki nem miktarı % 11,3 - 22,2 düzeyindeyken, kül miktarı % 8,2 - 34 ve yanar kükürt miktarı ise % 3,2-6 arasında değişmektedir. Bununla beraber Çan Linyit Havzalarında 1.000.000-ton civarında % 1 yanar kükürt içeren linyit rezervine sahiptir. Bölgedeki kömür yataklarında eskiden genellikle kapalı tarzda işletmecilik yapılırken, günümüzde Çan Yeniçeri Ocağı dışındaki tüm ocaklar açık olarak işletilmektedir. Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) tarafından Enerji Bakanlığına verilen Çan Kömür Havzası Etüt Raporuna göre, bu havzanın işletilebilir rezervi 78.122.206-ton kadardır. Bu miktarın 10.294.005 tonunun alt ısı değeri 4000 kcal/kg'dır. Geriye kalan 67.828.201-ton linyit rezervi ancak termik santrallerde değerlendirilebilecek türde linyitleri kapsamakta olup, bu linyitlerin alt ısı değeri 1850-2500 kcal/kg arasında değişmektedir. Yine aynı etüt raporuna göre Çan Linyitleri % 2,46 nem, % 24,97 kül ve % 3,62 yanar kükürt içermektedir. Bölgedeki kömürleri değerlendirmek üzere 2x160 MW'lık akışkan yataklı yakma sistemine göre Çan Termik Santrali dizayn edilmiştir. Akışkan yatak teknolojisinde kükürt, linyitin yanması sırasında kireçtaşı ilave edilerek % 90' lık bir verimle tutulmakta olup, bu şekilde yönetmeliklerin öngördüğü sınır değerler sağlanmakta ve baca gazı desülfürizasyonu tesisine gerek kalmayan tesis Çanakkale'nin Çan İlçesi'ne bağlı Kulfa ve Yaya köyleri arasındaki 1600 dönümlük arazi üzerine kurulmuştur [20].

Yukarıdada bahsedildiği gibi iki ayrı 160MW ünitesi olan ve toplamda 320MW kurulu gücü ile Türkiyenin 60. Çanakkalenin ise 5. Büyük enerji santralidir. Tesis ayrıca Türkiye'nin 14. Büyük Linyit termik santralidir. Santralin kurulu güce oranı %0,34 üretim kapasitesi 2080 GWh-Yıl, yıllık elektrik üretimi 1.763 GWh'tir. 18 Mart Çan Termik Santrali ortalama 1.762.774.313 kilovatsaat elektrik üretimi ile 485.345 kişinin

günlük hayatında ihtiyaç duyduğu (konut, sanayi, metro ulaşımı, resmi daire, çevre aydınlatması gibi) tüm elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilir. 18 Mart Çan Termik Santrali sadece konut elektrik tüketimi dikkate alındığında ise 590.149 konutun elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilecek elektrik üretimi yapmaktadır. Çan Termik Santrali yıllık elektrik üretim bilgilerine aşağıdaki tablodan ulaşılabilmektedir [21].

Tablo 4.1 Çan termik santrali yıllık elektrik üretimi tablosu

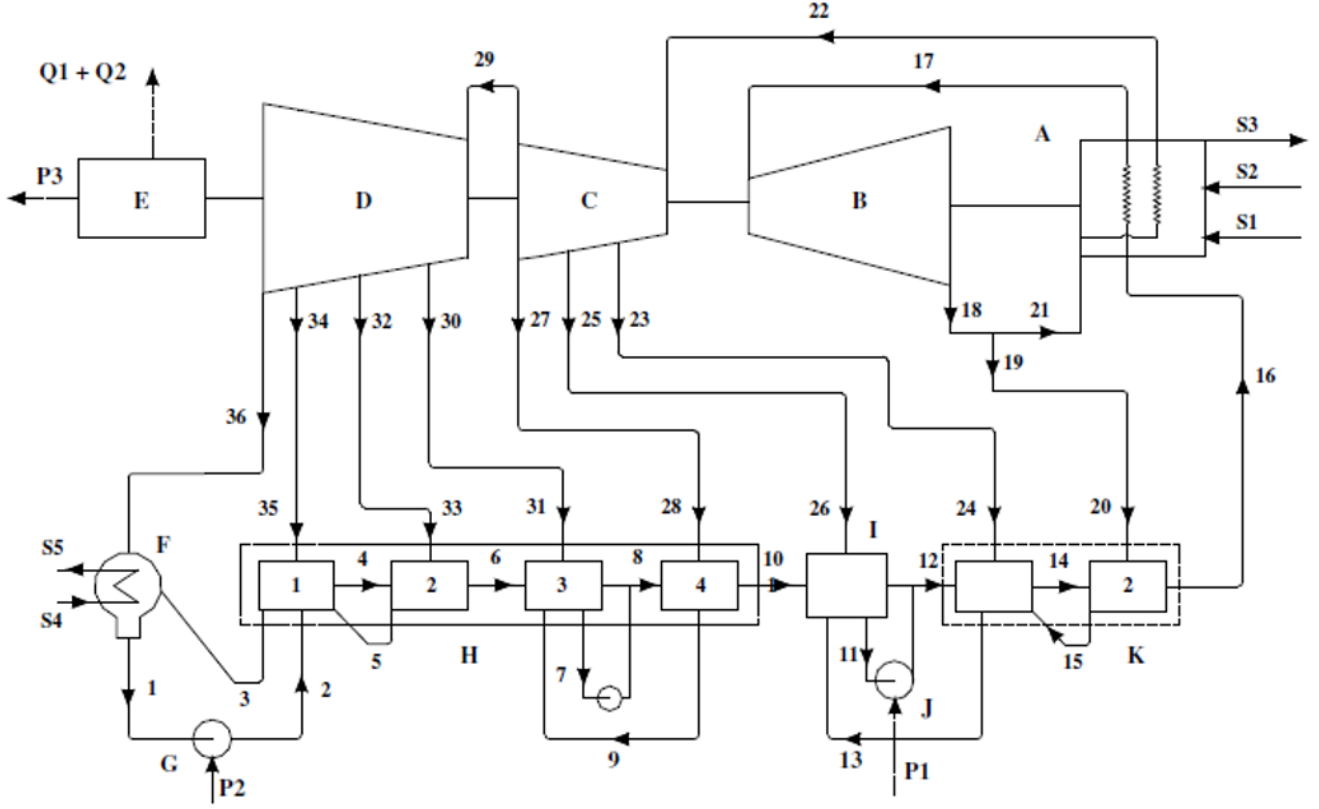
Yıl	Üretim (kWh)	İl Tüketimini Karşılama	Türkiye Tüketimini Karşılama
2004	459.700.000	%27	%0,31
2005	825.200.000	%46	%0,51
2006	1.260.800.000	%64	%0,72
2007	2.050.800.000	%96	%1,1
2008	2.191.500.000	%98	%1,1
2009	1.949.700.000	%89	%1,0
2010	2.141.100.000	%90	%1,0
2011	2.126.600.000	%53	%0,92
2012	1.449.500.000	%53	%0,60
2013	2.041.721.000	%74	%0,83
2014	1.916.852.000	%66	%0,75
2015	1.384.486.000	%46	%0,52
2016	1.959.169.000	%63	%0,71
2017	1.864.369.000	%57	%0,64
2018	2.449.067.000	%72	%0,81
2019	2.133.825.000	%62	%0,70



Şekil 4.1 Çan termik santrali şematik gösterimi [21]



Şekil 4.2 Çan termik santrali [21]



Şekil 4.3 Çan termik santrali ekipmanları Şematik Gösterimi [22]

- A: Buhar Kazanı ve Ara Isıtıcı
 B:Yüksek Basınç Türbini
 C: Orta Basınç Türbini
 D: Alçak Basınç Türbini
 E: Jeneratör ve Transformatör
 F: Kondenser
 S1: Yakıt Oranı (kg/s)
 S2: Hava Oranı (kg/s)

- G: Kondenser Çıkış Pompası
 H: Kapalı Besleme Suyu Isıtıcısı
 I : Açık Besleme Suyu Isıtıcısı
 J: Kazan Besleme Pompası
 K: Kapalı Besleme Suyu Isıtıcısı
 S3: Atık Gazlar
 S4: Kondenser Soğutma Suyu Giriş
 S5: Kondenser Soğutma Suyu Çıkış

Santral sistemi analizi için faydalanılan verilerin ilk kısmı yakıt girişi, hava gazı girişi, baca gazı çıkışı, soğutma suyu giriş ve çıkışı ile akımların sıcaklık, basınç ve debi değerleridir. Bu değerlerden faydalanılarak öncelikle EES üzerinde akımların entalpi ve entropi değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerleri aşağıdaki tablodan ulaşılabilir.

Tablo 4.2 Akımların sıcaklık, basınç, debi değerleri [22]

Akım	Sıcaklık (K)	Basınç (MPa)	Debi (kg/s)
S1	288	0,1	35,714
S2	288	0,1	165
S3	411	0,1	196,02
S4	288	0,1	4388,89
S5	292,3	0,1	4388,89
1	315,7	0,0085	94,333
2	318,3	0,0097	94,333
3	324,3	0,0258	2,562
4	335,7	0,0258	94,333
5	341,7	0,0504	2,431
6	351,8	0,0504	94,333
7	388,9	0,3	13,511
8	389,2	0,3	135,734
9	395,2	0,5037	6,497
10	424,1	0,5037	107,783
11	453	1,5	129,145
12	456,6	1,5	129,149
13	464,5	2,098	6,546
14	488,8	2,15	127,042
15	496,8	3,961	9,498
16	522,8	3,961	127,042
17	813	17,2	127,042
18	603,5	4,042	122,735
19	603,5	4,042	9,665
20	602,7	3,961	9,665
21	603,5	4,042	115,165
22	813	3,719	115,165
23	727,1	2,13	6,546
24	726,9	2,098	6,546
25	627,2	1,045	5,983
26	626,8	1,003	5,313
27	540	0,5192	6,491

Tablo 4.3 Akımların sıcaklık, basınç, debi değerleri (devamı) [22]

Akım	Sıcaklık (K)	Basınç (MPa)	Debi (kg/s)
28	542,1	0,5037	6,491
29	540	0,5192	99,979
30	441,6	0,1954	6,352
31	441,3	0,1858	6,352
32	357,6	0,05249	2,431
33	354,5	0,05	2,431
34	339,5	0,026	2,163
35	338,7	0,025	2,165
36	316,4	0,0085	88,971

Tablo 4.4 Akımların entalpi, entropi değerleri

Akım	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kgK)
1	178,2	0,6062
2	189	0,6405
3	214,1	0,7186
4	261,8	0,8631
5	287	0,9372
6	329,3	1,059
7	485,8	1,482
8	487,1	1,485
9	512,7	1,55
10	636,4	1,852
11	762,8	2,138
12	778,7	2,172
13	814	2,248
14	923,5	2,477
15	960,8	2,548
16	1084	2,789
17	3396	6,399

Table 4.5 Akımların entalpi, entropi değerleri (devamı)

Akım	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kgK)
18	3041	6,493
19	3041	6,493
20	3041	6,502
21	3041	6,493
22	3539	7,241
23	3365	7,266
24	3365	7,273
25	3165	7,293
26	3165	7,312
27	2995	7,317
28	2999	7,34
29	2995	7,317
30	2807	7,378
31	2807	7,401
32	2651	7,587
33	2645	7,593
34	2620	7,819
35	2619	7,833
36	2579	8,209

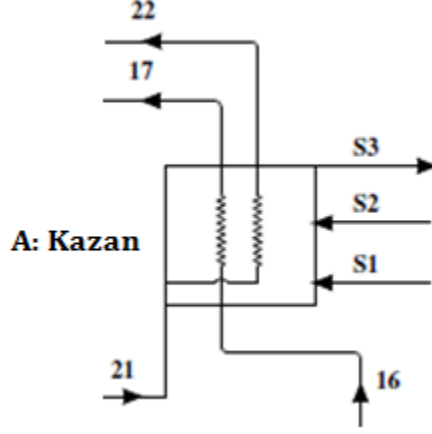
Bu çalışmada santralin herbir bileşeni ayrı ayrı ele alınarak girdi ve çıktı değerleri üzerinden enerji ve ekserji kayıpları hesaplanmıştır. Başka bir ifade ile santral modelindeki herbir bileşen ayrı bir kontrol hacmi olarak kabul edilmiştir.

4.2 Santral Ekipmanları Enerji Kayıpları

Ekipmanların enerji dengesi hesaplamasına kazan ile başlanacak ardından yukarıda verilmiş olan şemadaki sıra, saat yönünün tersinden takip edilerek yüksek basınç türbini, orta basınç türbini, alçak basınç türbini, kondenser, kondenser tahliye pompası,

alçak basınç besleme suyu ısıtıcıları, degazör, kazan besleme pompası ile devam edip yüksek basınç besleme suyu ısıtıcıları ile sona erecektir.

4.2.1 Kazan Enerji Kaybı Hesaplaması



Şekil 4.4 Kazan şematik gösterimi

Kazan enerji dengesi denklemi aşağıda verilmiştir. Bu hesaplama yapılırken denklemde görüldüğü gibi ilgili düğüm noktalarının entalpi ve entropi değerlerinin yanında kullanılan yakıt, baca gazı ve yakma havası için de enerji hesaplamaları yapılması gerekmektedir.

Ekipman Enerji Dengesi Hesaplarının İncelenmesi

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{kazan} = \dot{m}_{17}h_{17} + \dot{m}_{22}h_{22} - \dot{m}_{16}h_{16} - \dot{m}_{21}h_{21} - E_{yakıt} + \dot{E}_{baca\ gazı} \\ - \dot{E}_{yakma\ havası} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Bu kapsamda ilk olarak yakıt enerjisi hesaplanacaktır.

$$E_{yakıt} = m_{yakıt} AID_{yakıt} \quad (4.2)$$

Saniyede yakılan kömür miktarı 35,714 kg olup yakıtın alt ısıl değeri 4368 kcal/kg'dır. Bu kapsamda:

$$E_{yakıt} = 35,714.4368$$

$$E_{yakıt} = 155998,753 \frac{kcal}{s}$$

$$E_{yakıt} = 155998,752.4,186$$

$$E_{yakıt} = 653010,7759 \frac{kJ}{s}$$

Daha önce Clasius İfadesinde de bahsettiğimiz gibi türbin grubundan elde edilen net işin kazanda verilen ısıya oranı bize santralimizin termik verimini verir.

$$\eta_t = \frac{W_{net}}{Q_{ısı}} \quad (4.3)$$

$$Q_{ısı} = AID_{yakıt} \dot{m} 4.186$$

$$AID_{yakıt} = 4368 kcal/kg$$

$$\dot{m} = 35,714 kg/sn$$

$$Q_{ısı} = E_{yakıt}$$

$$W_{net} = 160\ 000 kJ/sn$$

Değerler yerlerine yazıldığında:

$$\eta_t = \frac{160\ 000 kJ/s}{4368 kcal/kg \cdot 35.714 kg/sn \cdot 4.186}$$

$$\eta_t = \%25$$

İkinci hesaplama baca gazı için yapılacaktır. Baca gazı enerji hesaplaması formülü aşağıdaki gibidir:

$$\dot{E}_{baca\ gazı} = E_{baca\ gazı} \dot{m}_{baca\ gazı} \quad (4.4)$$

Bu denklemde yer alan E_{bg} değerine aşağıdaki formül ile ulaşılabacaktır:

$$E_{baca\ gazı} = \bar{h}_{411} K_{baca\ gazı} - \bar{h}_{298} K_{baca\ gazı} \quad (4.5)$$

411 K değeri Tablo 4.2'de görüleceği gibi baca gazı sıcaklığıdır. Baca gazının entalpi değerini bu gazı oluşturan bileşenlerin entalpi değerleri belirlemektedir. İlgili bileşenler N₂, CO₂, H₂O ve SO₂'dir. Bu bileşenlerin baca gazı entalpisine etkileri ise baca gazında kapladıkları yer oranındadır. Karışımın molar oranları aşağıda belirtilen formül ile hesaplanacaktır:

$$x_i = \frac{n_i}{n_{\text{toplama}}} \quad (4.6)$$

Buna göre aşağıdaki oranlara ulaşılmaktadır:

$$X_{N_2} = \frac{0,20787}{0,28209} = 0,7368 \quad X_{CO_2} = \frac{0,04283}{0,28209} = 0,1519$$

$$X_{CO_2} = \frac{0,04283}{0,28209} = 0,1519 \quad X_{SO_2} = \frac{0,00072}{0,28209} = 0,0026$$

Bileşenlerin ilgili sıcaklıklarda entalpi değerleri aşağıdaki tabloda yer almaktadır.

Tablo 4.6 Baca gazı bileşenleri entalpi değerleri

Bileşen	$\bar{h}_{411 K}(\text{kJ/kmol})$	$\bar{h}_{298 K}(\text{kJ/kmol})$
N ₂	11932	8669
CO ₂	13787	9364
H ₂ O	13699	9904
SO ₂	19004	11797

Baca gazının çevre sıcaklığı (278 K) ve baca gazı sıcaklığı (411 K) değerlerinde entalpilerinin hesaplanması:

$$\bar{h}_{298 K \text{ baca gazı}} = x_{N_2} \bar{h}_{298 K N_2} + x_{CO_2} \bar{h}_{298 K CO_2} + x_{H_2O} \bar{h}_{298 K H_2O} + x_{SO_2} \bar{h}_{298 K SO_2} \quad (4.7)$$

$$\bar{h}_{298 K \text{ baca gazı}} = 0,7368.8669 + 0,1519.9364 + 0,1087.9904 + 0,0026.11797$$

$$\bar{h}_{298 K_{baca\ gazı}} = 8917 \frac{kJ}{kmol}$$

$$\bar{h}_{411 K_{baca\ gazı}} = x_{N_2} \bar{h}_{411 K_{N_2}} + x_{CO_2} \bar{h}_{411 K_{CO_2}} + x_{H_2O} \bar{h}_{411} + x_{SO_2} \bar{h}_{411 K_{SO_2}} \quad (4.8)$$

$$\bar{h}_{411 K_{baca\ gazı}} = 0,7368.11932 + 0,1519.13787 + 0,1087.13699 + 0,0026.19004$$

$$\bar{h}_{411 K_{baca\ gazı}} = 12424 \frac{kJ}{kmol}$$

Bulunan değerleri 4.5 numaralı denklemde yerine koyarsak:

$$E_{baca\ gazı} = 12424 - 8917$$

$$E_{baca\ gazı} = 3507 \frac{kJ}{kmol}$$

$$E_{baca\ gazı} = \frac{3507 \text{ kJ/kmol}}{29,44 \text{ kg/kmol}}$$

Not: 29,44 baca gazı mol ağırlığı değeridir.

$$E_{baca\ gazı} = 119,1 \frac{kJ}{kg}$$

Baca gazı enerji hesaplamasında verilen $E_{baca\ gazı}$ değerine ulaşıldı. 4.4 numaralı formülün tekrar üzerinden geçildiğinde ulaşılmaması gereken sıradaki değer $\dot{m}_{baca\ gazı}$ olduğu görülüyor.

$$\dot{m}_{bg} = \text{snde yakılan kömür miktarı} \cdot \text{snde oluşan baca gazı miktarı} \quad (4.9)$$

Not: 1 kg kömürün yanması için 10,17 kg hava gereklidir. Bu nedenle 1 kg kömürün yanması sonucu 11,17 kg baca gazı oluşmaktadır.

$$\dot{m}_{bg} = 35,714 \cdot 11,17$$

$$\dot{m}_{bg} = 398,9 \frac{kg}{s}$$

Buna göre baca gazı enerjisi:

$$\dot{E}_{\text{bacalı gazı}} = 119,1 \cdot 398,9$$

$$\dot{E}_{\text{bacalı gazı}} = 47522 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Hesaplanacak üçüncü değer yakma havası enerjisidir.

$$\dot{E}_{\text{yakma havası}} = \dot{m}_{\text{yakma havası}} (h_{411K_{\text{yakma havası}}} - h_{278K_{\text{yakma havası}}}) \quad (4.10)$$

$$\dot{E}_{\text{yakma havası}} = 165 \cdot (411,12 - 298,18)$$

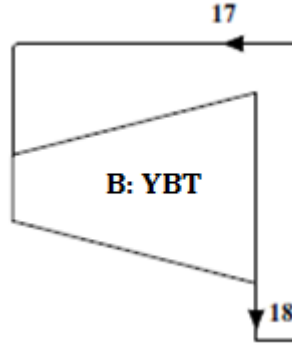
$$\dot{E}_{\text{yakma havası}} = 18635 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

4.1 numaralı eşitlikte verilen kazan enerji dengesi formülüne ulaştığımız değerleri yerleştirdiğimizde:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{kazan}} &= 127.3396 + 115,2.3539 - 127.1084 - 115,2.3041 - 653011 + 47522 \\ &\quad - 18635 \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{\text{kazan}} = -272890 \text{ kW}$$

4.2.2 Yüksek Basınç Türbini Enerji Kaybı Hesaplaması



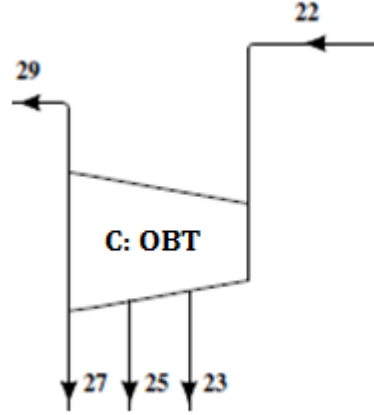
Şekil 4.5 Yüksek basınç türbini şematik gösterimi

$$\dot{Q}_{YBT} = \dot{m}_{18}h_{18} - \dot{m}_{17}h_{17} \quad (4.11)$$

$$\dot{Q}_{YBT} = (122,7 \times 3041) - (127 \times 3396)$$

$$\dot{Q}_{YBT} = -58282 \text{ kW}$$

4.2.3 Orta Basınç Türbini Enerji Kaybı Hesaplaması



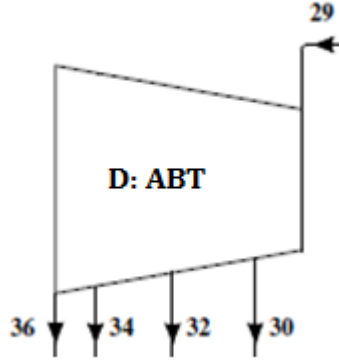
Şekil 4.6 Orta basınç türbini şematik gösterimi

$$\dot{Q}_{OBT} = \dot{m}_{23}h_{23} + \dot{m}_{25}h_{25} + \dot{m}_{27}h_{27} + \dot{m}_{29}h_{29} - \dot{m}_{22}h_{22} \quad (4.12)$$

$$\dot{Q}_{OBT} = 6,546 \times 3365 + 5,983 \times 3165 + 6,491 \times 2995 + 99,98 \times 2995 - 115,2 \times 3539$$

$$\dot{Q}_{OBT} = -47815 \text{ kW}$$

4.2.4 Alçak Basınç Türbini Enerji Kaybı Hesaplaması



Şekil 4.7 Alçak basınç türbini şematik gösterimi

$$\dot{Q}_{ABT} = \dot{m}_{30}h_{30} + \dot{m}_{32}h_{32} + \dot{m}_{34}h_{34} + \dot{m}_{36}h_{36} - \dot{m}_{29}h_{29} \quad (4.13)$$

$$\dot{Q}_{ABT} = 6,352 \times 2807 + 2,431 \times 2651 + 2,163 \times 2620 + 88,97 \times 2579 - 99,98 \times 2995$$

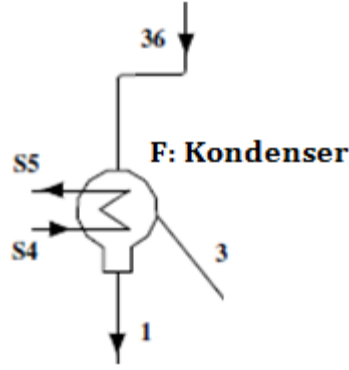
$$\dot{Q}_{ABT} = -39970 \text{ kW}$$

Türbin grubu kapasitesi 160000 KW'tır. Santralin bugüne kadarki çalışmaları göz önünde bulundurulduğunda türbin grubunun kapasitesi 0,80 olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle net iş $160000 \times 0,80 = 128000 \text{ kW}$ olarak hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_{Türbin} = \dot{Q}_{YBT} + \dot{Q}_{OBT} + \dot{Q}_{ABT} + WT \quad (4.14)$$

$$\dot{Q}_{Türbin} = -18067 \text{ kW}$$

4.2.5 Kondenser Enerji Kaybı Hesaplaması



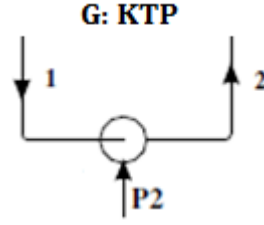
Şekil 4.8 Kondenser şematik gösterimi

$$\dot{Q}_{Kondenser} = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{S5} h_{S5} + \dot{m}_3 h_3 - (\dot{m}_{36} h_{36} + \dot{m}_{S4} h_{S4}) \quad (4.15)$$

$$\dot{Q}_{Kondenser} = 94,33 \times 178,2 + 4389 \times h_{S5} + 2,562 \times 214,1 - (88,97 \times 2579 + 4389 \times h_{S4})$$

$$\dot{Q}_{Kondenser} = -133174 \text{ kW}$$

4.2.6 Kondenser Tahliye Pompası Enerji Kaybı Hesaplaması

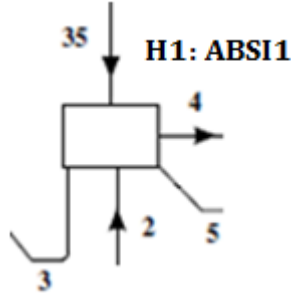


Şekil 4.9 Kondenser tahliye pompası şematik gösterimi

Kazan Besleme Suyu Pompası ile Kondenser Tahliye Pompası'nın ısı yoluyla kaybettiği enerji santralin diğer bileşenlerine oranla çok düşük olduğu için sıfır alınarak hesaplamalara dahil edilmemiştir.

$$\dot{Q}_{KTP} = 0 \text{ kW}$$

4.2.7 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1 Enerji Kaybı Hesaplaması



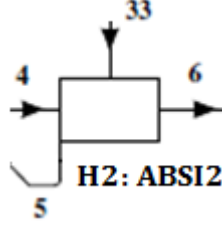
Şekil 4.10 Alçak basınç besleme suyu ısıtıcısı 1 şematik gösterimi

$$\dot{Q}_{ABSİ1} = \dot{m}_4 h_4 - (\dot{m}_{35} h_{35} + \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_5 h_5) \quad (4.16)$$

$$\dot{Q}_{ABSİ1} = 94,33 \times 261,8 - (2,165 \times 2619 + 94,33 \times 189 + 2,562 \times 214,1 + 2,431 \times 287)$$

$$\dot{Q}_{ABSİ1} = -49,61 \text{ kW}$$

4.2.8 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 2 Enerji Kaybı Hesaplaması



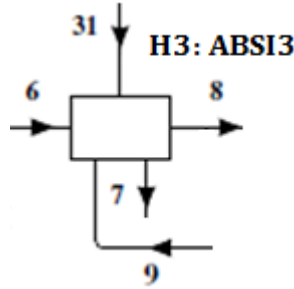
Şekil 4.11 Alçak basınç besleme suyu ısıtıcısı 2 şematik gösterimi

$$\dot{Q}_{ABSI2} = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_6 h_6 - (\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_{33} h_{33}) \quad (4.17)$$

$$\dot{Q}_{ABSI2} = 2,431 \times 287 + 94,33 \times 329,3 - (94,33 \times 261,8 + 2,431 \times 2645)$$

$$\dot{Q}_{ABSI2} = 628,7 \text{ kW}$$

4.2.9 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 3 Enerji Kaybı Hesaplaması



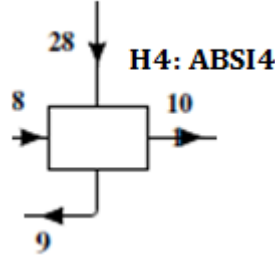
Şekil 4.12 Alçak basınç besleme suyu ısıtıcısı 3 şematik gösterimi

$$\dot{Q}_{ABSI3} = \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_7 h_7 - (\dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{31} h_{31}) \quad (4.18)$$

$$\dot{Q}_{ABSI3} = 135,7 \times 487,1 + 13,51 \times 485,8 - (94,33 \times 329,3 + 6,497 \times 512,7 + 6,352 \times 2807)$$

$$\dot{Q}_{ABSI3} = 20458 \text{ kW}$$

4.2.10 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 4 Enerji Kaybı Hesaplaması



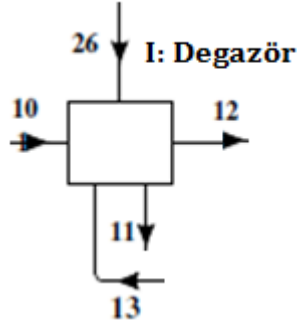
Şekil 4.13 Alçak basınç besleme suyu ısıtıcısı 4 şematik gösterimi

$$\dot{Q}_{ABSI4} = \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{10} h_{10} - (\dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{28} h_{28}) \quad (4.19)$$

$$\dot{Q}_{ABSI4} = 6,497 \times 512,7 + 107,8 \times 636,4 - (135,7 \times 487,1 + 6,491 \times 2999)$$

$$\dot{Q}_{ABSI4} = -13655 \text{ kW}$$

4.2.11 Degazör Enerji Kaybı Hesaplaması



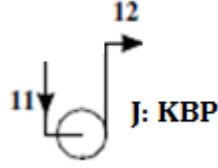
Şekil 4.14 Degazör şematik gösterimi

$$\dot{Q}_{Degazör} = \dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_{12} h_{12} - (\dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{26} h_{26} + \dot{m}_{13} h_{13}) \quad (4.20)$$

$$\dot{Q}_{Degazör} = 129,1 \times 762,8 + 129,1 \times 778,7 - (107,8 \times 636,4 + 5,313 \times 3165 + 6,546 \times 814)$$

$$\dot{Q}_{Degazör} = 108345 \text{ kW}$$

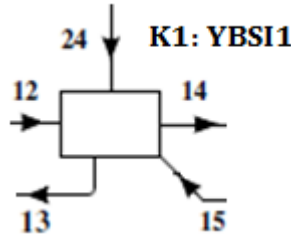
4.2.12 Kazan Besleme Pompası Enerji Kaybı Hesaplaması



Şekil 4.14 Kazan besleme pompası şematik gösterimi

$$\dot{Q}_{KBP} = 0 \text{ kW}$$

4.2.13 Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1 Enerji Kaybı Hesaplaması



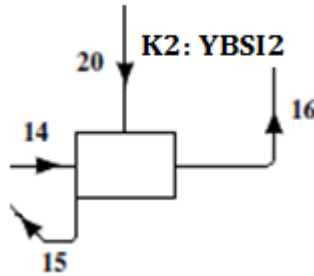
Şekil 4.15 Yüksek basınç besleme suyu ısıtıcısı 1 şematik gösterimi

$$\dot{Q}_{YBSI1} = \dot{m}_{14}h_{14} + \dot{m}_{13}h_{13} - (\dot{m}_{12}h_{12} + \dot{m}_{24}h_{24} + \dot{m}_{15}h_{15}) \quad (4.21)$$

$$\dot{Q}_{YBSI1} = 127 \times 923,5 + 6,546 \times 814 - (129,1 \times 778,7 + 6,546 \times 3365 + 9,498 \times 960,8)$$

$$\dot{Q}_{YBSI1} = -9067 \text{ kW}$$

4.2.14 Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 2 Enerji Kaybı Hesaplaması



Şekil 4.16 Yüksek basınç besleme suyu ısıtıcısı 2 şematik gösterimi

$$\dot{Q}_{YBSI2} = \dot{m}_{16}h_{16} + \dot{m}_{15}h_{15} - (\dot{m}_{14}h_{14} + \dot{m}_{20}h_{20}) \quad (4.22)$$

$$\dot{Q}_{YBSI2} = 127 \times 1084 + 9,498 \times 960,8 - (127 \times 923,5 + 9,665 \times 3041)$$

$$\dot{Q}_{YBSI2} = 79,64 \text{ kW}$$

4.3 Santral Ekipmanları Ekserji Kayıpları

Ekipman ekserji kayıplarına ulaşabilmek için öncelikle akımlar ile yakıt, baca gazı ve yakma havası için ekserji değerlerine ulaşmak gerekmektedir. Bu bölüm kapsamında hesaplanacak ekserjiler fiziksel ve kimyasal ekserjilerin toplamıdır. Bu değerlerin bulunmasının ardından ekipman ekserji kayıpları hesaplanacaktır.

4.3.1 Akımların Ekserji Değerleri

Daha önce de anlatıldığı gibi ekserjinin birçok birleşeni vardır. Ekserjinin birleşenlerinden nükleer, manyetik ve yüzey gerilim etkileri yok sayılırsa ekserji dört ana kısma ayrılır. Bunlar fiziksel ekserji (E^{FE}), kimyasal ekserji (E^{KE}), potansiyel ekserji (E^{PE}) ve kinetik ekserji (E^{KNE}) olarak sıralanabilir.

$$E(\text{Toplam Ekserji}) = E^{FE} + E^{KE} + E^{PE} + E^{KNE} \text{ (kj)} \quad (4.23)$$

Özgül ekserji ile çalışmak; analizimizin ilerleyen kısmında sonuçların değerlendirilmesi ve daha net şekilde yorumlanması için daha doğru olacaktır.

$$e = e^{FE} + e^{KNE} + e^{PE} + e^{KE} \text{ (kj/kg)} \quad (4.24)$$

Yukarıdaki denklem Fiziksel Kimyasal Potansiyel ve Kinetik ekserjilerin kg'a bölünmüş halini bir başka söylemle özgül ekserjilerin toplamını ifade eder.

Çevrenin haline doğru yani sistemin son sıcaklık ve basıncı T_0 ve P_0 olacak şekilde bir hal değişimi geçiren sabit bir kapalı sistem düşünülmesi halinde:

$$W_{\text{toplam yararlı}} = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (4.25)$$

Burada $W_{\text{toplam yararlı}}$, sistem verilen halden ölü hale tersinir bir hal değişimi ile geçerken üretilen toplam yararlı iştir ve tanım olarakta ekserjidir.

Genel olarak kapalı bir sitem kinetik ve potansiyel enerjiye sahip olabilir ve kapalı bir sitemin toplam enerjisi o sistemin ısı, kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamına eşittir. Kinetik ve potansiyel enerji eşitliklerinin ekserji eşitliklerine eşit olduklarını bilerek, m kütleli kapalı bir sistemin ekserjisi aşağıda verildiği gibi yazılabilir:

$$X = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + m \frac{V^2}{2} + mgz \quad (4.26)$$

Birim kütle esasına dayalı olarak, kapalı sistemin (veya kütle akışı olmayan sistemin) ekserjisi ϕ aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} \phi &= (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \\ &= (e - e_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) \end{aligned} \quad (4.27)$$

Burada u_0, v_0, s_0 ölü hal durumunda değerlendirilmiş sistemin özellikleridir. Bir sistemin ölü haldeki ekserjisinin $e = e_0, v = v_0, s = s_0$ olduğundan dolayı, sıfır olduğu bilinmelidir.

Bir hal değişimi sırasında, kapalı bir sistemin ekserji değişimi, 3.17 numaralı denklemden verildiği gibi sistemin son ve ilk ekserjileri arasındaki farktır. Buna göre birim kütle esasına dayalı olarak aşağıda verilen eşitlik yazılabilir.

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \phi_2 - \phi_1 \\ &= (u_2 - u_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \\ &= (e_2 - e_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) \end{aligned} \quad (4.28)$$

Hareketsiz kapalı sistemler için kinetik ve potansiyel enerji terimleri kullanılmaz. [1]

Akış işi temel olarak akış yönünde bir sıvı tarafından yapılan sınır işidir ve böylece akış işinin ekserjisi sınır işinin ekserjisine eşdeğerdir ve buda P_0 atmosfer basıncındaki havaya karşı yapılan fazladan işin, bir v hacminin yerini dolduran işidir. Akış işinin P_v olduğu ve atmosphere karşı yapılan işin P_0v olduğu dikkate alınır, akış enerjisinin ekserjisi aşağıda verildiği gibi yazılabilir:

$$x_{akış} = Pv - P_0v = (P - P_0)v \quad (4.29)$$

Bu nedenle, akış enerjisi ile ilişkili olan ekserji, akış işi bağıntısındaki P basıncının, $P - P_0$ ile yer değiştirmesi ile elde edilir. Öyleyse bir akışkan akımının ekserjisi, basitçe yukarıdaki akış ekserjisi ilişkisini, kütle akışı olmayan akışkan için yazılan kapalı sistem ekserjisi denklemi ilişkisine eklenerek belirlenebilir:

$$\begin{aligned} x_{akan akışkan} &= x_{akmayan akışkan} + x_{akış} \\ &= (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz + (P - P_0)v \\ &= (u + Pv) - (u_0 + P_0v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \\ &= (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \end{aligned} \quad (4.30)$$

Son ifade, akış (veya akım) ekserjisi olarak adlandırılır ve ψ ile gösterilir.

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (4.31)$$

İnceleyeceğimiz sistem göz önüne alındığında sistem durur halde olduğu için kinetik ve potansiyel ekserjiler göz ardı edilir ve fiziksel ekserji aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$e^{FE} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (4.32)$$

Toplam fiziksel ekserji akışı ise:

$$\dot{E}^{FE} = \dot{m}e^{FE} \quad (4.33)$$

Kullandığımız sistem sınırlandırılmış ölü halden çevre ile tam denge halinde olduğu ölü hale geçerken elde ettiğimiz ekserjiye kimyasal ekserji denir. Çevre şartlarının her yerde aynı olmaması sebebiyle standart bir çevre tanımlanmıştır. Çevrenin standart basıncı $P_0 = 1 \text{ atm}$ ve sıcaklığı $T_0 = 25^\circ\text{C}$ yani 298 K 'dir. Standart kimyasal ekserjinin hesaplanmasını şöyle anlatılabilir:

Sisteme T_0 , P_0 sıcaklığında ve basıncında giren gaz (havayı temsil eden ve N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O gazlarını ve başka gazları içeren karışım) izotermal olarak genişlemesi sonucu sistemi $x_k^e P_0$, T_0 şartlarında terkeder. Tersinmezlikler göz ardı edildiğinde yapılan teorik iş kimyasal ekserjiye eşit olur. Buradaki x_k^{KE} kullanılan gazın yukarıda belirttiğim çevre şartlarındaki mol kesiridir. O halde:

$$e_k^{KE} = -RT_0 \ln \frac{x_k^{KE} P_0}{P_0} = -RT_0 \ln x_k^{KE} \quad (4.34)$$

Yukarıdaki eşitlik tüm bileşenler için yazılırsa denklem aşağıdaki gibi olur.

$$e^{-KE} = \sum x_k e_k^{-KE} + RT_0 \sum x_k \ln x_k \quad \text{kJ/kg} \quad (4.35)$$

Gaz karışımları için yukarıda verilen eşitlikten faydalanılırken saf maddeler için kimyasal ekserji değerleri direkt aşağıdaki tablodan okunarak hesaplamalarda kullanılabilir.

Tablo 4.7 Bazı maddelerin standart kimyasal ekserjileri [23]

Madde	Mol Ağırlığı (kg/kmol)	Standart Kimyasal Ekserji (kJ/kmol)
N ₂ (g)	28	720
CO ₂ (g)	44	19870
O ₂ (g)	32	3970
C ₂ H ₆ (g)	30	1495840
CH ₄ (g)	16	831650
H ₂ O(g)	18	9500
H ₂ O(s)	18	500

Aşağıda sistemde yer alan 36 akım için tek tek fiziksel ve kimyasal ekserjiler hesaplanmıştır. Bunun ardından hesaplanan bu değerler toplanarak her akım için toplam ekserjilere ulaşılmıştır.

Santral içindeki bir akımın kimyasal ekserjisi hesaplanırken suyun ekserjisi standart olarak 2.5 kJ/kg alınıp debi ile çarpılmıştır.

4.3.1.1 1 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_1^{FE} = (h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0) \quad (4.36)$$

$$e_1^{FE} = (178,2 - 104,2) - 298(0,6062 - 0,3648)$$

$$e_1^{FE} = 2,024 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_1^{FE} = \dot{m}_1 e_1^{FE} \quad (4.37)$$

$$\dot{E}_1^{FE} = 94,333 \times 2,024$$

$$\dot{E}_1^{FE} = 190,9 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_1^{KE} = \dot{m}_1 \dot{e}_1^{KE} \quad (4.38)$$

$$\dot{E}_1^{KE} = 94,333 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_1^{KE} = 235,8 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_1^{FE+KE} = \dot{E}_1^{FE} + \dot{E}_1^{KE} \quad (4.39)$$

$$\dot{E}_1^{FE+KE} = 190,9 + 235,8$$

$$\dot{E}_1^{FE+KE} = 426,7 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.2 2 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_2^{FE} = (h_2 - h_0) - T_0(s_2 - s_0) \quad (4.40)$$

$$e_2^{FE} = (h_2 - h_0) - T_0(s_2 - s_0)$$

$$e_2^{FE} = (189 - 104,2) - 298(0,6405 - 0,3648)$$

$$e_2^{FE} = 2,676 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_2^{FE} = \dot{m}_2 e_2^{FE} \quad (4.41)$$

$$\dot{E}_2^{FE} = 94,333 \times 2,676$$

$$\dot{E}_2^{FE} = 252,5 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_2^{KE} = \dot{m}_2 e_2^{KE} \quad (4.42)$$

$$\dot{E}_2^{KE} = 94,333 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_2^{KE} = 235,8 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_2^{FE+KE} = \dot{E}_2^{FE} + \dot{E}_2^{KE} \quad (4.43)$$

$$\dot{E}_2^{FE+KE} = 252,5 + 235,8$$

$$\dot{E}_2^{FE+KE} = 488,3 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.3 3 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_3^{FE} = (h_3 - h_0) - T_0(s_3 - s_0) \quad (4.44)$$

$$e_3^{FE} = (214,1 - 104,2) - 298(0,7186 - 0,3648)$$

$$e_3^{FE} = 4,511 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_3^{FE} = \dot{m}_3 e_3^{FE} \quad (4.45)$$

$$\dot{E}_3^{FE} = 2,562 \times 4,511$$

$$\dot{E}_3^{FE} = 11,56 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_3^{KE} = \dot{m}_3 e_3^{KE} \quad (4.46)$$

$$\dot{E}_3^{KE} = 2,562 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_3^{KE} = 6,405 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_3^{FE+KE} = \dot{E}_3^{FE} + \dot{E}_3^{KE} \quad (4.47)$$

$$\dot{E}_3^{FE+KE} = 11,56 + 6,405$$

$$\dot{E}_3^{FE+KE} = 17,965 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.4 4 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_4^{FE} = (h_4 - h_0) - T_0(s_4 - s_0) \quad (4.48)$$

$$e_4^{FE} = (261,8 - 104,2) - 298(0,8631 - 0,3648)$$

$$e_4^{FE} = 9,13 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_4^{FE} = \dot{m}_4 e_4^{FE} \quad (4.49)$$

$$\dot{E}_4^{FE} = 94,333 \times 9,13$$

$$\dot{E}_4^{FE} = 861,3 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_4^{KE} = \dot{m}_4 e_4^{KE} \quad (4.50)$$

$$\dot{E}_4^{KE} = 94,333 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_4^{KE} = 235,8 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_4^{FE+KE} = \dot{E}_4^{FE} + \dot{E}_4^{KE} \quad (4.51)$$

$$\dot{E}_4^{FE+KE} = 861,3 + 235,8$$

$$\dot{E}_4^{FE+KE} = 1097,1 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.5 5 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_5^{FE} = (h_5 - h_0) - T_0(s_5 - s_0) \quad (4.52)$$

$$e_5^{FE} = (287 - 104,2) - 298(0,9372 - 0,3648)$$

$$e_5^{FE} = 12,17 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_5^{FE} = \dot{m}_5 e_5^{FE} \quad (4.53)$$

$$\dot{E}_5^{FE} = 2,341 \times 12,17$$

$$\dot{E}_5^{FE} = 29,59 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_5^{KE} = \dot{m}_5 e_5^{KE} \quad (4.54)$$

$$\dot{E}_5^{KE} = 2,431 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_5^{KE} = 6,078 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_5^{FE+KE} = \dot{E}_5^{FE} + \dot{E}_5^{KE} \quad (4.55)$$

$$\dot{E}_5^{FE+KE} = 29,59 + 6,078$$

$$\dot{E}_5^{FE+KE} = 35,668 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.6 6 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_6^{FE} = (h_6 - h_0) - T_0(s_6 - s_0) \quad (4.56)$$

$$e_6^{FE} = (329,3 - 104,2) - 298(1,059 - 0,3648)$$

$$e_6^{FE} = 18,12 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_6^{FE} = \dot{m}_6 e_6^{FE} \quad (4.57)$$

$$\dot{E}_6^{FE} = 94,333 \times 18,12$$

$$\dot{E}_6^{FE} = 1709 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_6^{KE} = \dot{m}_6 e_6^{KE} \quad (4.58)$$

$$\dot{E}_6^{KE} = 94,333 \frac{kg}{s} \times 2,5$$

$$\dot{E}_6^{KE} = 235,8 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_6^{FE+KE} = \dot{E}_6^{FE} + \dot{E}_6^{KE} \quad (4.59)$$

$$\dot{E}_6^{FE+KE} = 1709 + 235,8$$

$$\dot{E}_6^{FE+KE} = 1944,8 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.7 7 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_7^{FE} = (h_7 - h_0) - T_0(s_7 - s_0) \quad (4.60)$$

$$e_7^{FE} = (485,8 - 104,2) - 298(1,482 - 0,3648)$$

$$e_7^{FE} = 48,82 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_7^{FE} = \dot{m}_7 e_7^{FE} \quad (4.61)$$

$$\dot{E}_7^{FE} = 13,511 \times 48,82$$

$$\dot{E}_7^{FE} = 659,5 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_7^{KE} = \dot{m}_7 \dot{e}_7^{KE} \quad (4.62)$$

$$\dot{E}_7^{KE} = 13,511 \frac{kg}{s} \times 2,5$$

$$\dot{E}_7^{KE} = 33,78 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_7^{FE+KE} = \dot{E}_7^{FE} + \dot{E}_7^{KE} \quad (4.63)$$

$$\dot{E}_7^{FE+KE} = 659,5 + 33,78$$

$$\dot{E}_7^{FE+KE} = 693,28 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.8 8 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_8^{FE} = (h_8 - h_0) - T_0(s_8 - s_0) \quad (4.64)$$

$$e_8^{FE} = (487,1 - 104,2) - 298(1,485 - 0,3648)$$

$$e_8^{FE} = 49,11 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_8^{FE} = \dot{m}_8 e_8^{FE} \quad (4.65)$$

$$\dot{E}_8^{FE} = 135,734 \times 49,11$$

$$\dot{E}_8^{FE} = 6666 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_8^{KE} = \dot{m}_8 \dot{e}_8^{KE} \quad (4.66)$$

$$\dot{E}_8^{KE} = 135,734 \frac{kg}{s} \times 2,5$$

$$\dot{E}_8^{KE} = 339,3 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_8^{FE+KE} = \dot{E}_8^{FE} + \dot{E}_8^{KE} \quad (4.67)$$

$$\dot{E}_8^{FE+KE} = 6666 + 339,3$$

$$\dot{E}_8^{FE+KE} = 7005,3 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.9 9 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_9^{FE} = (h_9 - h_0) - T_0(s_9 - s_0) \quad (4.68)$$

$$e_9^{FE} = (512,7 - 104,2) - 298(1,55 - 0,3648)$$

$$e_9^{FE} = 55,43 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_9^{FE} = \dot{m}_9 e_9^{FE} \quad (4.69)$$

$$\dot{E}_9^{FE} = 6,497 \times 55,43$$

$$\dot{E}_9^{FE} = 360,1 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_9^{KE} = \dot{m}_9 \dot{e}_9^{KE} \quad (4.70)$$

$$\dot{E}_9^{KE} = 6,497 \frac{kg}{s} \times 2,5$$

$$\dot{E}_9^{KE} = 16,24 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_9^{FE+KE} = \dot{E}_9^{FE} + \dot{E}_9^{KE} \quad (4.71)$$

$$\dot{E}_9^{FE+KE} = 360,1 + 16,24$$

$$\dot{E}_9^{FE+KE} = 376,34 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.10 10 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{10}^{FE} = (h_{10} - h_0) - T_0(s_{10} - s_0) \quad (4.72)$$

$$e_{10}^{FE} = (636,4 - 104,2) - 298(1,852 - 0,3648)$$

$$e_{10}^{FE} = 89,12 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{10}^{FE} = \dot{m}_{10} e_{10}^{FE} \quad (4.73)$$

$$\dot{E}_{10}^{FE} = 107,783 \times 89,12$$

$$\dot{E}_{10}^{FE} = 9606 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{10}^{KE} = \dot{m}_{10} e_{10}^{KE} \quad (4.74)$$

$$\dot{E}_{10}^{KE} = 107,783 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{10}^{KE} = 269,5 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{10}^{FE+KE} = \dot{E}_{10}^{FE} + \dot{E}_{10}^{KE} \quad (4.75)$$

$$\dot{E}_{10}^{FE+KE} = 9606 + 269,5$$

$$\dot{E}_{10}^{FE+KE} = 9875,5 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.11 11 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{11}^{FE} = (h_{11} - h_0) - T_0(s_{11} - s_0) \quad (4.76)$$

$$e_{11}^{FE} = (762,8 - 104,2) - 298(2,138 - 0,3648)$$

$$e_{11}^{FE} = 130,4 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{11}^{FE} = \dot{m}_{11} e_{11}^{FE} \quad (4.77)$$

$$\dot{E}_{11}^{FE} = 129,145 \times 130,4$$

$$\dot{E}_{11}^{FE} = 16836 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{11}^{KE} = \dot{m}_{11} e_{11}^{KE} \quad (4.78)$$

$$\dot{E}_{11}^{KE} = 129,145 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{11}^{KE} = 322,9 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{11}^{FE+KE} = \dot{E}_{11}^{FE} + \dot{E}_{11}^{KE} \quad (4.79)$$

$$\dot{E}_{11}^{FE+KE} = 16836 + 322,9$$

$$\dot{E}_{11}^{FE+KE} = 17158,9 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.12 12 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{12}^{FE} = (h_{12} - h_0) - T_0(s_{12} - s_0) \quad (4.80)$$

$$e_{12}^{FE} = (778,7 - 104,2) - 298(2,172 - 0,3648)$$

$$e_{12}^{FE} = 135,8 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{12}^{FE} = \dot{m}_{12} e_{12}^{FE} \quad (4.81)$$

$$\dot{E}_{12}^{FE} = 129,149 \times 135,8$$

$$\dot{E}_{12}^{FE} = 17543 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{12}^{KE} = \dot{m}_{12} e_{12}^{KE} \quad (4.82)$$

$$\dot{E}_{12}^{KE} = 129,149 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{12}^{KE} = 322,9 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{12}^{FE+KE} = \dot{E}_{12}^{FE} + \dot{E}_{12}^{KE} \quad (4.83)$$

$$\dot{E}_{12}^{FE+KE} = 17543 + 322,9$$

$$\dot{E}_{12}^{FE+KE} = 17866 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.13 13 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{13}^{FE} = (h_{13} - h_0) - T_0(s_{13} - s_0) \quad (4.84)$$

$$e_{13}^{FE} = (814 - 104,2) - 298(2,248 - 0,3648)$$

$$e_{13}^{FE} = 148,7 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{13}^{FE} = \dot{m}_{13} e_{13}^{FE} \quad (4.85)$$

$$\dot{E}_{13}^{FE} = 6,546 \times 148,7$$

$$\dot{E}_{13}^{FE} = 973,5 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{13}^{KE} = \dot{m}_{13} e_{13}^{KE} \quad (4.86)$$

$$\dot{E}_{13}^{KE} = 6,546 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{13}^{KE} = 16,37 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{13}^{FE+KE} = \dot{E}_{13}^{FE} + \dot{E}_{13}^{KE} \quad (4.87)$$

$$\dot{E}_{13}^{FE+KE} = 973,5 + 16,37$$

$$\dot{E}_{13}^{FE+KE} = 989,9 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.14 14 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{14}^{FE} = (h_{14} - h_0) - T_0(s_{14} - s_0) \quad (4.88)$$

$$e_{14}^{FE} = (923,5 - 104,2) - 298(2,477 - 0,3648)$$

$$e_{14}^{FE} = 189,8 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{14}^{FE} = \dot{m}_{14} e_{14}^{FE} \quad (4.89)$$

$$\dot{E}_{14}^{FE} = 127,042 \times 189,8$$

$$\dot{E}_{14}^{FE} = 24113 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{14}^{KE} = \dot{m}_{14} e_{14}^{KE} \quad (4.90)$$

$$\dot{E}_{14}^{KE} = 127,042 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{14}^{KE} = 317,6 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{14}^{FE+KE} = \dot{E}_{14}^{FE} + \dot{E}_{14}^{KE} \quad (4.91)$$

$$\dot{E}_{14}^{FE+KE} = 24113 + 317,6$$

$$\dot{E}_{14}^{FE+KE} = 24430 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.15 15 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{15}^{FE} = (h_{15} - h_0) - T_0(s_{15} - s_0) \quad (4.92)$$

$$e_{15}^{FE} = (960,8 - 104,2) - 298(2,548 - 0,3648)$$

$$e_{15}^{FE} = 205,8 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{15}^{FE} = \dot{m}_{15} e_{15}^{FE} \quad (4.93)$$

$$\dot{E}_{15}^{FE} = 9,498 \times 205,8$$

$$\dot{E}_{15}^{FE} = 1955 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{15}^{KE} = \dot{m}_{15} e_{15}^{KE} \quad (4.94)$$

$$\dot{E}_{15}^{KE} = 9,498 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{15}^{KE} = 23,75 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{15}^{FE+KE} = \dot{E}_{15}^{FE} + \dot{E}_{15}^{KE} \quad (4.95)$$

$$\dot{E}_{15}^{FE+KE} = 1955 + 23,75$$

$$\dot{E}_{15}^{FE+KE} = 1979 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.16 16 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{16}^{FE} = (h_{16} - h_0) - T_0(s_{16} - s_0) \quad (4.96)$$

$$e_{16}^{FE} = (1084 - 104,2) - 298(2,789 - 0,3648)$$

$$e_{16}^{FE} = 256,9 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{16}^{FE} = \dot{m}_{16} e_{16}^{FE} \quad (4.97)$$

$$\dot{E}_{16}^{FE} = 127,042 \times 256,9$$

$$\dot{E}_{16}^{FE} = 32634 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{16}^{KE} = \dot{m}_{16} e_{16}^{KE} \quad (4.98)$$

$$\dot{E}_{16}^{KE} = 3,961 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{16}^{KE} = 317,6 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{16}^{FE+KE} = \dot{E}_{16}^{FE} + \dot{E}_{16}^{KE} \quad (4.99)$$

$$\dot{E}_{16}^{FE+KE} = 32634 + 317,6$$

$$\dot{E}_{16}^{FE+KE} = 32952 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.17 17 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{17}^{FE} = (h_{17} - h_0) - T_0(s_{17} - s_0) \quad (4.100)$$

$$e_{17}^{FE} = (3396 - 104,2) - 298(6,399 - 0,3648)$$

$$e_{17}^{FE} = 1494 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{17}^{FE} = \dot{m}_{17} e_{17}^{FE} \quad (4.101)$$

$$\dot{E}_{17}^{FE} = 127,042 \times 1494$$

$$\dot{E}_{17}^{FE} = 189767 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{17}^{KE} = \dot{m}_{17} e_{17}^{KE} \quad (4.102)$$

$$\dot{E}_{17}^{KE} = 127,042 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{17}^{KE} = 317,6 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{17}^{FE+KE} = \dot{E}_{17}^{FE} + \dot{E}_{17}^{KE} \quad (4.103)$$

$$\dot{E}_{17}^{FE+KE} = 189767 + 317,6$$

$$\dot{E}_{17}^{FE+KE} = 190084 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.18 18 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{18}^{FE} = (h_{18} - h_0) - T_0(s_{18} - s_0) \quad (4.104)$$

$$e_{18}^{FE} = (3041 - 104,2) - 298(6,493 - 0,3648)$$

$$e_{18}^{FE} = 1110 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{18}^{FE} = \dot{m}_{18} e_{18}^{FE} \quad (4.105)$$

$$\dot{E}_{18}^{FE} = 122,735 \times 1110$$

$$\dot{E}_{18}^{FE} = 136254 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{18}^{KE} = \dot{m}_{18} e_{18}^{KE} \quad (4.106)$$

$$\dot{E}_{18}^{KE} = 122,735 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{18}^{KE} = 306,8 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{18}^{FE+KE} = \dot{E}_{18}^{FE} + \dot{E}_{18}^{KE} \quad (4.107)$$

$$\dot{E}_{18}^{FE+KE} = 136254 + 306,8$$

$$\dot{E}_{18}^{FE+KE} = 136561 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.19 19 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{19}^{FE} = (h_{19} - h_0) - T_0(s_{19} - s_0) \quad (4.108)$$

$$e_{19}^{FE} = (3041 - 104,2) - 298(6,493 - 0,3648)$$

$$e_{19}^{FE} = 10754 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{19}^{FE} = \dot{m}_{19} e_{19}^{FE} \quad (4.109)$$

$$\dot{E}_{19}^{FE} = 9,665 \times 10754$$

$$\dot{E}_{19}^{FE} = 10730 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{19}^{KE} = \dot{m}_{19} e_{19}^{KE} \quad (4.110)$$

$$\dot{E}_{19}^{KE} = 9,665 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{19}^{KE} = 24,16 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{19}^{FE+KE} = \dot{E}_{19}^{FE} + \dot{E}_{19}^{KE} \quad (4.111)$$

$$\dot{E}_{19}^{FE+KE} = 10730 + 24,16$$

$$\dot{E}_{19}^{FE+KE} = 10754 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.20 20 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{20}^{FE} = (h_{20} - h_0) - T_0(s_{20} - s_0) \quad (4.112)$$

$$e_{20}^{FE} = (3041 - 104,2) - 298(6,502 - 0,3648)$$

$$e_{20}^{FE} = 1108 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{20}^{FE} = \dot{m}_{20} e_{20}^{FE} \quad (4.113)$$

$$\dot{E}_{20}^{FE} = 9,665 \times 1108$$

$$\dot{E}_{20}^{FE} = 10706 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{20}^{KE} = \dot{m}_{20} e_{20}^{KE} \quad (4.114)$$

$$\dot{E}_{20}^{KE} = 9,665 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{20}^{KE} = 24,16 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{20}^{FE+KE} = \dot{E}_{20}^{FE} + \dot{E}_{20}^{KE} \quad (4.115)$$

$$\dot{E}_{20}^{FE+KE} = 10706 + 24,16$$

$$\dot{E}_{20}^{FE+KE} = 10730 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.21 21 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{21}^{FE} = (h_{21} - h_0) - T_0(s_{21} - s_0) \quad (4.116)$$

$$e_{21}^{FE} = (3041 - 104,2) - 298(6,493 - 0,3648)$$

$$e_{21}^{FE} = 1110 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{21}^{FE} = \dot{m}_{21} e_{21}^{FE} \quad (4.117)$$

$$\dot{E}_{21}^{FE} = 115,165 \times 1110$$

$$\dot{E}_{21}^{FE} = 127851 \text{ kJ/s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{21}^{KE} = \dot{m}_{21} \dot{e}_{21}^{KE} \quad (4.118)$$

$$\dot{E}_{21}^{KE} = 115,165 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{21}^{KE} = 287,9 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{21}^{FE+KE} = \dot{E}_{21}^{FE} + \dot{E}_{21}^{KE} \quad (4.119)$$

$$\dot{E}_{21}^{FE+KE} = 127851 + 287,9$$

$$\dot{E}_{21}^{FE+KE} = 128138 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.22 22 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{22}^{FE} = (h_{22} - h_0) - T_0(s_{22} - s_0) \quad (4.120)$$

$$e_{22}^{FE} = (3539 - 104,2) - 298(7,241 - 0,3648)$$

$$e_{22}^{FE} = 1386 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{22}^{FE} = \dot{m}_{22} e_{22}^{FE} \quad (4.121)$$

$$\dot{E}_{22}^{FE} = 115,165 \times 1386$$

$$\dot{E}_{22}^{FE} = 159602 \text{ kJ/s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{22}^{KE} = \dot{m}_{22} e_{22}^{KE} \quad (4.122)$$

$$\dot{E}_{22}^{KE} = 115,165 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{22}^{KE} = 287,9 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{22}^{FE+KE} = \dot{E}_{22}^{FE} + \dot{E}_{22}^{KE} \quad (4.123)$$

$$\dot{E}_{22}^{FE+KE} = 159602 + 287,9$$

$$\dot{E}_{22}^{FE+KE} = 159890 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.23 23 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{23}^{FE} = (h_{23} - h_0) - T_0(s_{23} - s_0) \quad (4.124)$$

$$e_{23}^{FE} = (3365 - 104,2) - 298(7,266 - 0,3648)$$

$$e_{23}^{FE} = 1204 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{23}^{FE} = \dot{m}_{23} e_{23}^{FE} \quad (4.125)$$

$$\dot{E}_{23}^{FE} = 6,546 \times 1204$$

$$\dot{E}_{23}^{FE} = 7880 \text{ kJ/s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{23}^{KE} = \dot{m}_{23} e_{23}^{KE} \quad (4.126)$$

$$\dot{E}_{23}^{KE} = 6,546 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{23}^{KE} = 16,37 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{23}^{FE+KE} = \dot{E}_{23}^{FE} + \dot{E}_{23}^{KE} \quad (4.127)$$

$$\dot{E}_{23}^{FE+KE} = 7880 + 16,37$$

$$\dot{E}_{23}^{FE+KE} = 7896,37 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.24 24 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{24}^{FE} = (h_{24} - h_0) - T_0(s_{24} - s_0) \quad (4.128)$$

$$e_{24}^{FE} = (3365 - 104,2) - 298(7,273 - 0,3648)$$

$$e_{24}^{FE} = 1202 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{24}^{FE} = \dot{m}_{24} e_{24}^{FE} \quad (4.129)$$

$$\dot{E}_{24}^{FE} = 6,546 \times 1202$$

$$\dot{E}_{24}^{FE} = 7867 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{24}^{KE} = \dot{m}_{24} e_{24}^{KE} \quad (4.130)$$

$$\dot{E}_{24}^{KE} = 6,546 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{24}^{KE} = 16,37 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{24}^{FE+KE} = \dot{E}_{24}^{FE} + \dot{E}_{24}^{KE} \quad (4.131)$$

$$\dot{E}_{24}^{FE+KE} = 7867 + 16,37$$

$$\dot{E}_{24}^{FE+KE} = 7883,37 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.25 25 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{25}^{FE} = (h_{25} - h_0) - T_0(s_{25} - s_0) \quad (4.132)$$

$$e_{25}^{FE} = (3165 - 104,2) - 298(7,293 - 0,3648)$$

$$e_{25}^{FE} = 996,3 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{25}^{FE} = \dot{m}_{25} e_{25}^{FE} \quad (4.133)$$

$$\dot{E}_{25}^{FE} = 5,983 \times 996,3$$

$$\dot{E}_{25}^{FE} = 5961 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{25}^{KE} = \dot{m}_{25} e_{25}^{KE} \quad (4.134)$$

$$\dot{E}_{25}^{KE} = 5,983 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{25}^{KE} = 14,96 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{25}^{FE+KE} = \dot{E}_{25}^{FE} + \dot{E}_{25}^{KE} \quad (4.135)$$

$$\dot{E}_{25}^{FE+KE} = 5961 + 14,96$$

$$\dot{E}_{25}^{FE+KE} = 5975,96 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.26 26 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{26}^{FE} = (h_{26} - h_0) - T_0(s_{26} - s_0) \quad (4.136)$$

$$e_{26}^{FE} = (3165 - 104,2) - 298(7,312 - 0,3648)$$

$$e_{26}^{FE} = 990,7 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{26}^{FE} = \dot{m}_{26} e_{26}^{FE} \quad (4.137)$$

$$\dot{E}_{26}^{FE} = 5,313 \times 990,7$$

$$\dot{E}_{26}^{FE} = 5264 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{26}^{KE} = \dot{m}_{26} e_{26}^{KE} \quad (4.138)$$

$$\dot{E}_{26}^{KE} = 5,313 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{26}^{KE} = 13,28 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{26}^{FE+KE} = \dot{E}_{26}^{FE} + \dot{E}_{26}^{KE} \quad (4.139)$$

$$\dot{E}_{26}^{FE+KE} = 5264 + 13,28$$

$$\dot{E}_{26}^{FE+KE} = 5277,28 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.27 27 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{27}^{FE} = (h_{27} - h_0) - T_0(s_{27} - s_0) \quad (4.140)$$

$$e_{27}^{FE} = (2995 - 104,2) - 298(7,317 - 0,3648)$$

$$e_{27}^{FE} = 818,4 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{27}^{FE} = \dot{m}_{27} e_{27}^{FE} \quad (4.141)$$

$$\dot{E}_{27}^{FE} = 6,491 \times 818,4$$

$$\dot{E}_{27}^{FE} = 5312 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{27}^{KE} = \dot{m}_{27} e_{27}^{KE} \quad (4.142)$$

$$\dot{E}_{27}^{KE} = 6,491 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{27}^{KE} = 16,23 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{27}^{FE+KE} = \dot{E}_{27}^{FE} + \dot{E}_{27}^{KE} \quad (4.143)$$

$$\dot{E}_{27}^{FE+KE} = 5312 + 16,23$$

$$\dot{E}_{27}^{FE+KE} = 5328,23 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.28 28 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{28}^{FE} = (h_{28} - h_0) - T_0(s_{28} - s_0) \quad (4.144)$$

$$e_{28}^{FE} = (2999 - 104,2) - 298(7,34 - 0,3648)$$

$$e_{28}^{FE} = 816,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{28}^{FE} = \dot{m}_{28} e_{28}^{FE} \quad (4.145)$$

$$\dot{E}_{28}^{FE} = 6,491 \times 816,5$$

$$\dot{E}_{28}^{FE} = 5300 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{28}^{KE} = \dot{m}_{28} e_{28}^{KE} \quad (4.146)$$

$$\dot{E}_{28}^{KE} = 6,491 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{28}^{KE} = 16,23 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{28}^{FE+KE} = \dot{E}_{28}^{FE} + \dot{E}_{28}^{KE} \quad (4.147)$$

$$\dot{E}_{28}^{FE+KE} = 5300 + 16,23$$

$$\dot{E}_{28}^{FE+KE} = 5316,23 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.29 29 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{29}^{FE} = (h_{29} - h_0) - T_0(s_{29} - s_0) \quad (4.148)$$

$$e_{29}^{FE} = (2995 - 104,2) - 298(7,317 - 0,3648)$$

$$e_{29}^{FE} = 818,4 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{29}^{FE} = \dot{m}_{29} e_{29}^{FE} \quad (4.149)$$

$$\dot{E}_{29}^{FE} = 99,979 \times 818,4$$

$$\dot{E}_{29}^{FE} = 81822 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{29}^{KE} = \dot{m}_{29} e_{29}^{KE} \quad (4.150)$$

$$\dot{E}_{29}^{KE} = 99,979 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{29}^{KE} = 249,9 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{29}^{FE+KE} = \dot{E}_{29}^{FE} + \dot{E}_{29}^{KE} \quad (4.151)$$

$$\dot{E}_{29}^{FE+KE} = 81822 + 249,9$$

$$\dot{E}_{29}^{FE+KE} = 82072 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.30 30 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{30}^{FE} = (h_{30} - h_0) - T_0(s_{30} - s_0) \quad (4.152)$$

$$e_{30}^{FE} = (2807 - 104,2) - 298(7,378 - 0,3648)$$

$$e_{30}^{FE} = 612,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{30}^{FE} = \dot{m}_{30} e_{30}^{FE} \quad (4.153)$$

$$\dot{E}_{30}^{FE} = 6,352 \times 612,5$$

$$\dot{E}_{30}^{FE} = 3891 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{30}^{KE} = \dot{m}_{30} e_{30}^{KE} \quad (4.154)$$

$$\dot{E}_{30}^{KE} = 6,352 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{30}^{KE} = 15,88 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{30}^{FE+KE} = \dot{E}_{30}^{FE} + \dot{E}_{30}^{KE} \quad (4.155)$$

$$\dot{E}_{30}^{FE+KE} = 3891 + 15,88$$

$$\dot{E}_{30}^{FE+KE} = 3907 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.31 31 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{31}^{FE} = (h_{31} - h_0) - T_0(s_{31} - s_0) \quad (4.156)$$

$$e_{31}^{FE} = (2807 - 104,2) - 298(7,401 - 0,3648)$$

$$e_{31}^{FE} = 605,7 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{31}^{FE} = \dot{m}_{31} e_{31}^{FE} \quad (4.157)$$

$$\dot{E}_{31}^{FE} = 6,352 \times 605,7$$

$$\dot{E}_{31}^{FE} = 3847 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{31}^{KE} = \dot{m}_{31} e_{31}^{KE} \quad (4.158)$$

$$\dot{E}_{31}^{KE} = 6,352 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{31}^{KE} = 15,88 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{31}^{FE+KE} = \dot{E}_{31}^{FE} + \dot{E}_{31}^{KE} \quad (4.159)$$

$$\dot{E}_{31}^{FE+KE} = 3847 + 15,88$$

$$\dot{E}_{31}^{FE+KE} = 3863 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.32 32 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{32}^{FE} = (h_{32} - h_0) - T_0(s_{32} - s_0) \quad (4.160)$$

$$e_{32}^{FE} = (2651 - 104,2) - 298(7,587 - 0,3648)$$

$$e_{32}^{FE} = 394,7 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{32}^{FE} = \dot{m}_{32} e_{32}^{FE} \quad (4.161)$$

$$\dot{E}_{32}^{FE} = 2,431 \times 394,7$$

$$\dot{E}_{32}^{FE} = 959,6 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{32}^{KE} = \dot{m}_{32} \dot{e}_{32}^{KE} \quad (4.162)$$

$$\dot{E}_{32}^{KE} = 2,431 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{32}^{KE} = 6,078 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{32}^{FE+KE} = \dot{E}_{32}^{FE} + \dot{E}_{32}^{KE} \quad (4.163)$$

$$\dot{E}_{32}^{FE+KE} = 959,6 + 6,078$$

$$\dot{E}_{32}^{FE+KE} = 965,6 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.33 33 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{33}^{FE} = (h_{33} - h_0) - T_0(s_{33} - s_0) \quad (4.164)$$

$$e_{33}^{FE} = (2645 - 104,2) - 298(7,593 - 0,3648)$$

$$e_{33}^{FE} = 387,2 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{33}^{FE} = \dot{m}_{33} e_{33}^{FE} \quad (4.165)$$

$$\dot{E}_{33}^{FE} = 2,431 \times 387,2$$

$$\dot{E}_{33}^{FE} = 941,2 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{33}^{KE} = \dot{m}_{33} e_{33}^{KE} \quad (4.166)$$

$$\dot{E}_{33}^{KE} = 2,431 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{33}^{KE} = 6,078 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{33}^{FE+KE} = \dot{E}_{33}^{FE} + \dot{E}_{33}^{KE} \quad (4.167)$$

$$\dot{E}_{33}^{FE+KE} = 941,2 + 6,078$$

$$\dot{E}_{33}^{FE+KE} = 947,2 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.34 34 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{34}^{FE} = (h_{34} - h_0) - T_0(s_{34} - s_0) \quad (4.168)$$

$$e_{34}^{FE} = (2620 - 104,2) - 298(7,819 - 0,3648)$$

$$e_{34}^{FE} = 294,3 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{34}^{FE} = \dot{m}_{34} e_{34}^{FE} \quad (4.169)$$

$$\dot{E}_{34}^{FE} = 2,163 \times 294,3$$

$$\dot{E}_{34}^{FE} = 636,6 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{34}^{KE} = \dot{m}_{34} e_{34}^{KE} \quad (4.170)$$

$$\dot{E}_{34}^{KE} = 2,163 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{34}^{KE} = 5,408 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{34}^{FE+KE} = \dot{E}_{34}^{FE} + \dot{E}_{34}^{KE} \quad (4.171)$$

$$\dot{E}_{34}^{FE+KE} = 636,6 + 5,408$$

$$\dot{E}_{34}^{FE+KE} = 642 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.35 35 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{35}^{FE} = (h_{35} - h_0) - T_0(s_{35} - s_0) \quad (4.172)$$

$$e_{35}^{FE} = (2619 - 104,2) - 298(7,833 - 0,3648)$$

$$e_{35}^{FE} = 288,8 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{35}^{FE} = \dot{m}_{35} e_{35}^{FE} \quad (4.173)$$

$$\dot{E}_{35}^{FE} = 2,165 \times 288,8$$

$$\dot{E}_{35}^{FE} = 625,3 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{35}^{KE} = \dot{m}_{35} e_{35}^{KE} \quad (4.174)$$

$$\dot{E}_{35}^{KE} = 2,165 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{35}^{KE} = 5,413 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{35}^{FE+KE} = \dot{E}_{35}^{FE} + \dot{E}_{35}^{KE} \quad (4.175)$$

$$\dot{E}_{35}^{FE+KE} = 625,3 + 5,413$$

$$\dot{E}_{35}^{FE+KE} = 630,7 \frac{kJ}{s}$$

4.3.1.36 36 nolu akımın ekserjisi

Fiziksel ekserjisi:

$$e_{36}^{FE} = (h_{36} - h_0) - T_0(s_{36} - s_0) \quad (4.176)$$

$$e_{36}^{FE} = (2579 - 104,2) - 298(8,209 - 0,3648)$$

$$e_{36}^{FE} = 137,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{36}^{FE} = \dot{m}_{36} e_{36}^{FE} \quad (4.177)$$

$$\dot{E}_{36}^{FE} = 88,971 \times 137,5$$

$$\dot{E}_{36}^{FE} = 12236 \frac{kJ}{s}$$

Kimyasal ekserjisi:

$$\dot{E}_{36}^{KE} = \dot{m}_{36} e_{36}^{KE} \quad (4.178)$$

$$\dot{E}_{36}^{KE} = 88,971 \frac{kg}{s} \times 2,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{36}^{KE} = 222,4 \frac{kJ}{s}$$

Toplam ekserjisi:

$$\dot{E}_{36}^{FE+KE} = \dot{E}_{36}^{FE} + \dot{E}_{36}^{KE} \quad (4.179)$$

$$\dot{E}_{36}^{FE+KE} = 12236 + 222,4$$

$$\dot{E}_{36}^{FE+KE} = 12458 \frac{kJ}{s}$$

Tablo 4.8 Akımların fiziksel, kimyasal ve toplam ekserji değerleri

Akım	Fiziksel Ekserji (kJ/s)	Kimyasal Ekserji (kJ/s)	Toplam Ekserji (kJ/s)
1	190,9	235,8	426,7
2	252,5	235,8	488,3
3	11,56	6,405	17,96
4	861,3	235,8	1097
5	29,59	6,078	35,67
6	1709	235,8	1945
7	659,5	33,78	693,28
8	6666	339,3	7005,3
9	360,1	16,24	376,34
10	9606	269,5	9875,5
11	16836	322,9	17158,9
12	17543	322,9	17865,9
13	973,5	16,37	989,9
14	24113	317,6	24430
15	1955	23,75	1979
16	32634	317,6	32952
17	189767	317,6	190084
18	136254	306,8	136561
19	10730	24,16	10754
20	10706	24,16	10730
21	127851	287,9	128138
22	159602	287,9	159890
23	7880	16,37	7896,37
24	7867	16,37	7883,37
25	5961	14,96	5975,96
26	5264	13,28	5277,28
27	5312	16,23	5328,23
28	5300	16,23	5316,23
29	81822,2	249,9	82072
30	3891	15,88	3907
31	3847	15,88	3863
32	959,6	6,078	965,6
33	941,2	6,078	947,2
34	636,6	5,408	642
35	625,3	5,413	630,7
36	12236	222,4	12458

4.3.2 Yakıt, Baca Gazı ve Yakma Havası Ekserji Değerleri

4.3.2.1 Yakıtın ekserjisi

Yakıtın toplam ekserjisi 424000kW olarak kaynak makaleden alınmıştır. [22]

Termik güç santralının ekserji verimi santralden elde edilen net gücün yakıtın ekserjisine oranıdır.

Yakıtın kimyasal ekserjisi, yakıtın bileşenlerine bağlı olarak değişir. Szargut ve Stryrlska; yakıt ekserjisinin yakıtın ısı değerine oranını ifade eden (φ) değerini geliştirmişlerdir. [25]

$$\varphi = Ex_0/H_u \quad (4.180)$$

Formülde Ex_0 yakıtın ekserjisini ifade ederken H_u ise yakıtın alt ısı değeridir.

φ değeri aşağıda verildiği gibi hesaplanır.

$$\varphi = 1,0437 + 0,1882 \left(\frac{h}{c}\right) + 0,0610 \left(\frac{o}{c}\right) + 0,0404 \left(\frac{n}{c}\right) \quad (4.181)$$

c: Kömür içindeki karbon yüzdesi

h: Kömür içindeki hidrojen yüzdesi

o: Kömür içindeki oksijen yüzdesi

n: Kömür içindeki nitorjen yüzdesi

Katı yakıtın ekserjisi:

$$E_{X_{0,katı}} = \varphi(H_u + wh_{fg}) \quad (4.182)$$

$$E_{X_g} = E_{X_{0,katı}} + m_{kömür} \quad (4.183)$$

w: Yakıt İçerisindeki Nem Oranını,

h_{fg} : Çevre Sıcaklığındaki Suyun Buharlaştırma Entalpisini

$m_{kömür}$: Yakıtın Kütleli Değeri

E_{X_g} : katı yakıt tarafından sisteme verilen toplam ekserji miktarı

Termik güç santralinin ekserji verimi:

$$\eta = \frac{P_{top}}{E_{Xg}} \quad (4.184)$$

$$\eta = \frac{160000}{424000} = 0,377358$$

$$\eta = \%37,7$$

Tablo 4.6 Kömürün Element Analizi

Tanımlama	Sembol	Değer
Karbon (%)	c	42,75
Hidrojen (%)	h	1,6
Azot (%)	n	0,5
Oksijen (%)	o	22,45
Kül (%)	-	45
Nem(%)	w	20

4.3.2.2 Baca Gazı Ekserjisi

Baca gazı ekserji hesaplamalarında baca gazı bileşenleri dikkate alınacaktır. Detaylı bileşen hesaplamaları kazan enerji kaybı hesabında verildiği için işlemler burada tekrarlanmayacak ve sadece sonuçlarına yer verilecektir. Baca gazı N₂, CO₂, H₂O ve SO₂'den oluşmaktadır. Molar oranları ise sırasıyla 0,7368, 0,1519, 0,1087 ve 0,0026'dır.

Bu bölümde baca gazının daha önce bulunan entalpi değerlerinin yanında entropi değeri de hesaplanacak ardından bu değerler kullanılarak baca gazı fiziksel ekserjisi hesaplanacaktır.

İlgili sıcaklıklarda baca gazı entalpi değerleri:

$$\bar{h}_{298 K_{baca\ gazı}} = 8917 \frac{kJ}{kmol} \quad \bar{h}_{411 K_{baca\ gazı}} = 12424 \frac{kJ}{kmol}$$

Çevre sıcaklığı baca gazı entropi değeri hesaplaması:

$$\begin{aligned} \bar{s}_{298 K_{baca\ gazı}} = & x_{N_2} \bar{s}_{298 K_{N_2}} + x_{CO_2} \bar{s}_{298 K_{CO_2}} + x_{H_2O} \bar{s}_{298 K_{H_2O}} \\ & + x_{SO_2} \bar{s}_{298 K_{SO_2}} \end{aligned} \quad (4.185)$$

$$\bar{s}_{298 K_{N_2}} = s_{298 K_{N_2}} - R \ln x_{N_2} \quad (4.186)$$

Not: R ideal gaz sabiti değeri 8,314'tür.

$$\bar{s}_{298 K_{N_2}} = 191,502 - 8,314 \cdot \ln(0,7368)$$

$$\bar{s}_{298 K_{N_2}} = 194 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$$

$$\bar{s}_{298 K_{CO_2}} = s_{298 K_{CO_2}} - R \ln x_{CO_2} \quad (4.187)$$

$$\bar{s}_{298 K_{CO_2}} = 231,685 - 8,314 \cdot \ln(0,1519)$$

$$\bar{s}_{298 K_{CO_2}} = 229,4 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$$

$$\bar{s}_{298 K_{H_2O}} = s_{298 K_{H_2O}} - R \ln x_{H_2O} \quad (4.188)$$

$$\bar{s}_{298 K_{H_2O}} = 188,720 - 8,314 \cdot \ln(0,1087)$$

$$\bar{s}_{298 K_{H_2O}} = 207,2 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$$

$$\bar{s}_{298 K_{SO_2}} = s_{298 K_{SO_2}} - R \ln x_{SO_2} \quad (4.189)$$

$$\bar{s}_{298 K_{SO_2}} = 333,5609 - 8,314 \cdot \ln(0,0026)$$

$$\bar{s}_{298 K_{SO_2}} = 383,2 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$$

$$\begin{aligned} \bar{s}_{298 K_{baca\ gazı}} &= x_{N_2} \bar{s}_{298 K_{N_2}} + x_{CO_2} \bar{s}_{298 K_{CO_2}} + x_{H_2O} \bar{s}_{298 K_{H_2O}} \\ &+ x_{SO_2} \bar{s}_{298 K_{SO_2}} \end{aligned} \quad (4.190)$$

$$\bar{s}_{298 K_{baca\ gazı}} = 0,7368 \cdot 194 + 0,1519 \cdot 229,4 + 0,1087 \cdot 207,2 + 0,0026 \cdot 383,2$$

$$\bar{s}_{298 K_{baca\ gazı}} = 201,3 \frac{kJ}{kmol.K}$$

411 K baca gazı entropi değeri hesaplaması:

$$\bar{s}_{411K} = x_{N_2} \bar{s}_{411 K_{N_2}} + x_{CO_2} \bar{s}_{411 K_{CO_2}} + x_{H_2O} \bar{s}_{411 K_{H_2O}} + x_{SO_2} \bar{s}_{411 K_{SO_2}} \quad (4.191)$$

$$\bar{s}_{411 K_{N_2}} = s_{411 K_{N_2}} - R \ln x_{N_2} \quad (4.192)$$

$$\bar{s}_{411 K_{N_2}} = 200,794 - 8,314 \cdot \ln(0,7368)$$

$$\bar{s}_{411 K_{N_2}} = 203,2 \frac{kJ}{kmol.K}$$

$$\bar{s}_{411 K_{CO_2}} = s_{411 K_{CO_2}} - R \ln x_{CO_2} \quad (4.193)$$

$$\bar{s}_{411 K_{CO_2}} = 226,250 - 8,314 \cdot \ln(0,1519)$$

$$\bar{s}_{411 K_{CO_2}} = 241,9 \frac{kJ}{kmol.K}$$

$$\bar{s}_{411 K_{H_2O}} = s_{411 K_{H_2O}} - R \ln x_{H_2O} \quad (4.194)$$

$$\bar{s}_{411 K_{H_2O}} = 199,512 - 8,314 \cdot \ln(0,1087)$$

$$\bar{s}_{411 K_{H_2O}} = 218 \frac{kJ}{kmol.K}$$

$$\bar{s}_{411 K_{SO_2}} = s_{411 K_{SO_2}} - R \ln x_{SO_2} \quad (4.195)$$

$$\bar{s}_{411 K_{SO_2}} = 304,605 - 8,314 \cdot \ln(0,0026)$$

$$\bar{s}_{411 K_{SO_2}} = 354,2 \frac{kJ}{kmol.K}$$

$$\bar{s}_{411K} = x_{N_2} \bar{s}_{411K_{N_2}} + x_{CO_2} \bar{s}_{411K_{CO_2}} + x_{H_2O} \bar{s}_{411K_{H_2O}} + x_{SO_2} \bar{s}_{411K_{SO_2}} \quad (4.196)$$

$$\bar{s}_{411K} = 0,7368.203,3 + 0,1519.241,9 + 0,1087.218 + 0,0026.354,2$$

$$\bar{s}_{411K} = 211,2 \frac{kJ}{kmol.K}$$

Baca gazı fiziksel ekserji hesaplaması:

$$E_{baca\ gazı}^{FE} = (\bar{h}_{411K} - \bar{h}_{298K}) - T_{298K}(\bar{s}_{411K} - \bar{s}_{298K}) \quad (4.197)$$

$$E_{baca\ gazı}^{FE} = (12424 - 8917) - 298(211,2 - 201,3)$$

$$E_{baca\ gazı}^{FE} = 570,4 \frac{kJ}{kmol}$$

$$E_{baca\ gazı}^{FE} = \frac{570,4}{29,44}$$

$$E_{baca\ gazı}^{FE} = 19,38 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{baca\ gazı}^{FE} = \dot{m}_{baca\ gazı} E_{baca\ gazı} \quad (4.198)$$

$$\dot{E}_{baca\ gazı}^{FE} = 398,9.19,38$$

$$\dot{E}_{baca\ gazı}^{FE} = 7729 \frac{kJ}{s}$$

Baca gazı kimyasal ekserji hesaplaması:

$$\begin{aligned} E_{baca\ gazı}^{KE} &= x_{N_2} e_{N_2}^{-KE} + x_{CO_2} e_{CO_2}^{-KE} + x_{H_2O} e_{H_2O}^{-KE} + x_{SO_2} e_{SO_2}^{-KE} \\ &+ RT_0(x_{N_2} \ln x_{N_2} + x_{CO_2} \ln x_{CO_2} + x_{H_2O} \ln x_{H_2O} \\ &+ x_{SO_2} \ln x_{SO_2}) \end{aligned} \quad (4.199)$$

Not: e^{-KE} standart kimyasal ekserjileri göstermektedir.

$$E_{\text{bacalı gazı}}^{KE} = 0,7368.720 + 0,1519.19870 + 0,1087.9500 + 0,0026.313400 \\ + 8,314.298. (0,7368. \ln(0,7368) + 0,1519. \ln(0,1519) \\ + 0,1087. \ln(0,1087) + 0,0026. \ln(0,0026))$$

$$E_{\text{bacalı gazı}}^{KE} = 3478 \frac{kJ}{kmol}$$

$$E_{\text{bacalı gazı}}^{KE} = \frac{3478 \text{ kJ}}{29,44 \text{ kg}}$$

$$E_{\text{bacalı gazı}}^{KE} = 118,1 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{\text{bacalı gazı}}^{KE} = \dot{m}_{\text{bacalı gazı}} E_{\text{bacalı gazı}}^{CH} \quad (4.200)$$

$$\dot{E}_{\text{bacalı gazı}}^{KE} = 398,9.118,1$$

$$\dot{E}_{\text{bacalı gazı}}^{KE} = 47132 \frac{kJ}{s}$$

4.3.2.3 Yakma Havası Ekserjisi

Yakma havası fiziksel ekserjisi çevre şartlarında olduğu için 0'dır.

Yakma havası kimyasal ekserjisi hesaplaması:

$$e_{\text{yakma havası}}^{KE} = x_{O_2} e_{O_2}^{KE} + x_{N_2} e_{N_2}^{KE} + RT_0 (x_{O_2} \ln x_{O_2}^{KE} + x_{N_2} \ln x_{N_2}^{KE}) \quad (4.201)$$

$$e_{\text{yakma havası}}^{KE} = 0,21.3970 + 0,79.720 + 8,314.298. (0,21. \ln(0,21) + 0,79. \ln(0,79))$$

$$e_{\text{yakma havası}}^{KE} = 129,1 \frac{kJ}{kmol}$$

$$e_{\text{yakma havası}}^{KE} = \frac{129,1 \text{ kJ}}{29,44 \text{ kg}}$$

$$e_{\text{yakma havası}}^{KE} = 4,476 \frac{kJ}{kg}$$

$$E_{yakma\ havası}^{KE} = \dot{m}_{yakma\ havası} e_{yakma\ havası}^{CH} \quad (4.202)$$

$$E_{yakma\ havası}^{KE} = (10,17.35,714).4,476$$

$$E_{yakma\ havası}^{KE} = 1626 \frac{kJ}{s}$$

4.3.3 Ekipman Ekserji Kayıpları

Ekipmanlara giren ve çıkan ekserji arasındaki fark ekipman ekserji kaybını ifade etmektedir.

$$\dot{E}_{kayıp} = \dot{E}_{giren} - \dot{E}_{çıkan} \quad (4.203)$$

4.3.3.1 Kazan Ekserji Kaybı

Kazana giren akımların fiziksel ve kimyasal ekserjileri toplamından kazandan çıkan akımların fiziksel ve kimyasal ekserjileri toplamı çıkartılmış ve böylece kazan ekserji kaybı hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} \dot{E}_{kazan\ ky} = & (\dot{E}_{yakıt} + \dot{E}_{S2}^{FE+KE} + \dot{E}_{16}^{FE+KE} + \dot{E}_{21}^{FE+KE}) - (\dot{E}_{17}^{FE+KE} \\ & + \dot{E}_{22}^{FE+KE} + \dot{E}_{S3}^{FE+KE}) \end{aligned} \quad (4.204)$$

$$\dot{E}_{kazan\ ky} = (653011 + 0 + 32952 + 128138) - (190084 + 159890 + 22000)$$

$$\dot{E}_{kazan\ ky} = 442126 \frac{kJ}{s}$$

4.3.3.2 Türbin Grubu Ekserji Kaybı

Türbin gurubuna giren akımların fiziksel ve kimyasal ekserjileri toplamından türbin grubundan çıkan akımların fiziksel ve kimyasal ekserjileri toplamı çıkartılmış ve böylece Türbin gurubu ekserji kaybı hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} \dot{E}_{t\ddot{u}rb\ddot{u}n\ ky} = & (\dot{E}_{17}^{FE+KE} + \dot{E}_{22}^{FE+KE} + \dot{E}_{29}^{FE+KE}) - (\dot{E}_{18}^{FE+KE} + \dot{E}_{23}^{FE+KE} \\ & + \dot{E}_{25}^{FE+KE} + \dot{E}_{27}^{FE+KE} + \dot{E}_{30}^{FE+KE} + \dot{E}_{32}^{FE+KE} + \dot{E}_{34}^{FE+KE} \\ & + \dot{E}_{36}^{FE+KE} + \dot{E}_{t\ddot{u}rb\ddot{u}n\ i\ddot{s}i}) \end{aligned} \quad (4.205)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{t\ddot{u}rb\ddot{u}n\ ky} = & (190084 + 159890 + 82072) - (136561 + 7897 + 5976 + 5328 \\ & + 3907 + 965,6 + 642 + 12458 + 128000) \end{aligned}$$

$$\dot{E}_{t\ddot{u}rb\ddot{u}n\ ky} = 130312 \frac{kJ}{s}$$

4.3.3.3 Kondenser Ekserji Kaybı

Kondensere giren akımların fiziksel ve kimyasal ekserjileri toplamından kondenserden çıkan akımların fiziksel ve kimyasal ekserjieri toplamı çıkartılmış ve böylece kondenser ekserji kaybı hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{kondenser\ ky} = \dot{E}_{36}^{FE+KE} - (\dot{E}_1^{FE+KE} + \dot{E}_3^{FE+KE}) \quad (4.206)$$

$$\dot{E}_{kondenser\ ky} = 12458 - (426,7 + 17,96)$$

$$\dot{E}_{kondenser\ ky} = 12014 \frac{kJ}{s}$$

4.3.3.4 Kondenser Tahliye Pompası Ekserji Kaybı

$$\dot{E}_{ktp\ ky} = W_{ktp} - (W_{ktp} \times Verim_{ktp}) \quad (4.207)$$

$$\dot{E}_{ktp\ ky} = 751 - (751 \times 0,33)$$

$$\dot{E}_{ktp\ ky} = 503,2 \frac{kJ}{s}$$

4.3.3.5 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1 Ekserji Kaybı

Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1 (ABSİ1)'e giren akımların fiziksel ve kimyasal ekserjileri toplamından ABSİ1'den çıkan akımların fiziksel ve kimyasal ekserjieri toplamı çıkartılmış ve böylece ABSİ1 ekserji kaybı hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{absi1\ ky} = \dot{E}_{35}^{FE+KE} + \dot{E}_3^{FE+KE} + \dot{E}_2^{FE+KE} + \dot{E}_5^{FE+KE} - \dot{E}_4^{FE+KE} \quad (4.208)$$

$$\dot{E}_{absi1\ ky} = 630,7 + 17,96 + 488,3 + 35,67 - 1097$$

$$\dot{E}_{absi1\ ky} = 75,46 \frac{kJ}{s}$$

4.3.3.6 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 2 Ekserji Kaybı

ABSİ2'e giren akımların fiziksel ve kimyasal ekserjileri toplamından ABSİ2'den çıkan akımların fiziksel ve kimyasal ekserjileri toplamı çıkartılmış ve böylece ABSİ2 ekserji kaybı hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{absi2\ ky} = \dot{E}_{33}^{FE+KE} + \dot{E}_4^{FE+KE} - (\dot{E}_6^{FE+KE} + \dot{E}_5^{FE+KE}) \quad (4.209)$$

$$\dot{E}_{absi2\ ky} = 947,2 + 1097 - (1945 + 35,67)$$

$$\dot{E}_{absi2\ ky} = 63,77 \frac{kJ}{s}$$

4.3.3.7 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 3 Ekserji Kaybı

ABSİ3'e giren akımların fiziksel ve kimyasal ekserjileri toplamından ABSİ3'den çıkan akımların fiziksel ve kimyasal ekserjileri toplamı çıkartılmış ve böylece ABSİ3 ekserji kaybı hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{absi3\ ky} = \dot{E}_{31}^{FE+KE} + \dot{E}_6^{FE+KE} + \dot{E}_9^{FE+KE} - \dot{E}_7^{FE+KE} \quad (4.210)$$

$$\dot{E}_{absi3\ ky} = 3863 + 1945 + 376,4 - 693,3$$

$$\dot{E}_{absi3\ ky} = 5491 \frac{kJ}{s}$$

4.3.3.8 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 4 Ekserji Kaybı

ABSİ4'e giren akımların fiziksel ve kimyasal ekserjileri toplamından ABSİ4'den çıkan akımların fiziksel ve kimyasal ekserjileri toplamı çıkartılmış ve böylece ABSİ4 ekserji kaybı hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{absi4\ ky} = \dot{E}_{28}^{FE+KE} + \dot{E}_8^{FE+KE} - (\dot{E}_{10}^{FE+KE} + \dot{E}_9^{FE+KE}) \quad (4.211)$$

$$\dot{E}_{absi4\ ky} = 5316 + 7006 - (9875 + 376,4)$$

$$\dot{E}_{absi4\ ky} = 2070 \frac{kJ}{s}$$

4.3.3.9 Degazör Ekserji Kaybı

Degazör'e giren akımların fiziksel ve kimyasal ekserjileri toplamından Degazör'den çıkan akımların fiziksel ve kimyasal ekserjieri toplamı çıkartılmış ve böylece Degazör ekserji kaybı hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{degazör\ ky} = \dot{E}_{10}^{FE+KE} + \dot{E}_{26}^{FE+KE} + \dot{E}_{13}^{FE+KE} - \dot{E}_{11}^{FE+KE} \quad (4.212)$$

$$\dot{E}_{degazör\ ky} = 9875 + 5277 + 989,9 - 17159$$

$$\dot{E}_{degazör\ ky} = 1016 \frac{kJ}{s}$$

4.3.3.10 Kazan Besleme Pompası Ekserji Kaybı

Kazan besleme pompası'na giren akımların fiziksel ve kimyasal ekserjileri toplamından Kazan Besleme Pompası'ndan çıkan akımların fiziksel ve kimyasal ekserjieri toplamı çıkartılmış ve böylece Kazan Besleme Pompası ekserji kaybı hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{kbp\ ky} = W_{kbp} - (W_{kbp} \times Verim_{kbp}) \quad (4.213)$$

$$\dot{E}_{kbp\ ky} = 1295 - (1295 \times 0,61)$$

$$\dot{E}_{kbp\ ky} = 505,1 \frac{kJ}{s}$$

4.3.3.11 Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1 Ekserji Kaybı

Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1 (YBSI1)'e giren akımların fiziksel ve kimyasal ekserjileri toplamından YBSI1'den çıkan akımların fiziksel ve kimyasal ekserjieri toplamı çıkartılmış ve böylece YBSI1 ekserji kaybı hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{ybsi1\ ky} = \dot{E}_{24}^{FE+KE} + \dot{E}_{12}^{FE+KE} + \dot{E}_{15}^{FE+KE} - (\dot{E}_{14}^{FE+KE} + \dot{E}_{13}^{FE+KE}) \quad (4.214)$$

$$\dot{E}_{ybsi1\ ky} = 7883 + 17866 + 1979 - (24430 + 989,9)$$

$$\dot{E}_{ybsi1\ ky} = 2308 \frac{kJ}{s}$$

4.3.3.12 Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 2 Ekserji Kaybı

YBSI2'e giren akımların fiziksel ve kimyasal ekserjileri toplamından YBSI2'den çıkan akımların fiziksel ve kimyasal ekserjieri toplamı çıkartılmış ve böylece YBSI2 ekserji kaybı hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{ybsi2\ ky} = \dot{E}_{20}^{FE+KE} + \dot{E}_{14}^{FE+KE} - (\dot{E}_{15}^{FE+KE} + \dot{E}_{16}^{FE+KE}) \quad (4.215)$$

$$\dot{E}_{ybsi2\ ky} = 10730 + 24430 - (1979 + 32952)$$

$$\dot{E}_{ybsi2\ ky} = 229,7 \frac{kJ}{s}$$

4.3.3.13 Toplam Ekserji Kaybı

Toplam ekserji kaybı tüm ekipmanların ekserji kayıpları toplamı ile bulunur.

$$\begin{aligned} \dot{E}_{toplaml\ ky} = & \dot{E}_{kazan\ ky}^{FE+KE} + \dot{E}_{türbin\ ky}^{FE+KE} + \dot{E}_{kondenser\ ky}^{FE+KE} + \dot{E}_{pompa2\ ky}^{FE+KE} \\ & + \dot{E}_{pompa1\ ky}^{FE+KE} + \dot{E}_{absi1\ ky}^{FE+KE} + \dot{E}_{absi2\ ky}^{FE+KE} + \dot{E}_{absi3\ ky}^{FE+KE} \\ & + \dot{E}_{absi4\ ky}^{FE+KE} + \dot{E}_{degazör\ ky}^{FE+KE} + \dot{E}_{ybsi1\ ky}^{FE+KE} + \dot{E}_{ybsi2\ ky}^{FE+KE} \end{aligned} \quad (4.216)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{toplaml\ ky} = & 442126 + 130312 + 12014 + 503,2 + 505,1 + 75,46 + 63,77 + 5491 \\ & + 2070 + 1016 + 2308 + 229,7 \end{aligned}$$

$$\dot{E}_{toplaml\ ky} = 596713 \frac{kJ}{s}$$

Tablo 4.9 Santral ekipmanları ekserji kayıpları

Ekipman	Ekserji Kaybı (kJ/s)
Kazan	442126
Türbin Grubu	130312
Kondenser	12014
Kondenser Tahliye Pompası	503,2
Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1	75,46
Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 2	63,77
Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 3	5491
Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 4	2070
Degazör	1016
Kazan Besleme Pompası	505,1
Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1	2308
Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 2	229,7
Toplam	596713

4.3.4 Ekipman Ekserji Kayıpları Oranları

Ekipmanların ekserji kayıpları ekipman ekserji kaybının toplam ekserji kaybına bölünmesi ile bulunur.

4.3.4.1 Kazan Ekserji Kaybı Oranı

Kazan Ekserji kaybının toplam ekserji kaybına oranı kazan ekserji kaybı oranını verir.

$$y_{kazan\ ky} = \frac{\dot{E}_{kazan\ ky}}{\sum \dot{E}_{ky}} \quad (4.217)$$

$$y_{kazan\ ky} = \frac{442126}{596713}$$

$$y_{kazan\ ky} = 0,7409$$

4.3.4.2 Türbin Grubu Ekserji Kaybı Oranı

Türbin grubu ekserji kaybının toplam ekserji kaybına oranı türbin grubu ekserji kaybı oranını verir.

$$y_{t\ddot{u}rbin\ ky} = \frac{\dot{E}_{t\ddot{u}rbin\ ky}}{\sum \dot{E}_{ky}} \quad (4.218)$$

$$y_{t\ddot{u}rbin\ ky} = \frac{130312}{596713}$$

$$y_{t\ddot{u}rbin\ ky} = 0,2183$$

4.3.4.3 Kondenser Ekserji Kaybı Oranı

Kondenser ekserji kaybının toplam ekserji kaybına oranı kondenser ekserji kaybı oranını verir.

$$y_{kondenser\ ky} = \frac{\dot{E}_{kondenser\ ky}}{\sum \dot{E}_{ky}} \quad (4.219)$$

$$y_{kondenser\ ky} = \frac{12014}{596713}$$

$$y_{kondenser\ ky} = 0,0201$$

4.3.4.4 Kondenser Tahliye Pompası Ekserji Kaybı Oranı

Kondenser Tahliye pompası ekserji kaybının toplam ekserji kaybına oranı kondenser tahliye pompası ekserji kaybı oranını verir.

$$y_{ktp\ ky} = \frac{\dot{E}_{ktp\ ky}}{\sum \dot{E}_{ky}} \quad (4.220)$$

$$y_{ktp\ ky} = \frac{503,2}{596713}$$

$$y_{ktp\ ky} = 0,0008432$$

4.3.4.5 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1 Ekserji Kaybı Oranı

ABS11 ekserji kaybının toplam ekserji kaybına oranı ABS11 ekserji kaybı oranını verir.

$$y_{abs1\ ky} = \frac{\dot{E}_{abs1\ ky}}{\sum \dot{E}_{ky}} \quad (4.221)$$

$$y_{abs1\ ky} = \frac{75,46}{596713}$$

$$y_{abs1\ ky} = 0,0001264$$

4.3.4.6 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 2 Ekserji Kaybı Oranı

ABSİ2 ekserji kaybının toplam ekserji kaybına oranı ABSİ2 ekserji kaybı oranını verir.

$$y_{abs2\ ky} = \frac{\dot{E}_{abs2\ ky}}{\sum \dot{E}_{ky}} \quad (4.222)$$

$$y_{abs2\ ky} = \frac{63,77}{596713}$$

$$y_{abs2\ ky} = 0,0001068$$

4.3.4.7 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 3 Ekserji Kaybı Oranı

ABSİ3 ekserji kaybının toplam ekserji kaybına oranı ABSİ3 ekserji kaybı oranını verir.

$$y_{abs3\ ky} = \frac{\dot{E}_{abs3\ ky}}{\sum \dot{E}_{ky}} \quad (4.223)$$

$$y_{abs3\ ky} = \frac{5491}{596713}$$

$$y_{abs3\ ky} = 0,009202$$

4.3.4.8 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 4 Ekserji Kaybı Oranı

ABSİ4 ekserji kaybının toplam ekserji kaybına oranı ABSİ4 ekserji kaybı oranını verir.

$$y_{abs14\ ky} = \frac{\dot{E}_{abs14\ ky}}{\sum \dot{E}_{ky}} \quad (4.224)$$

$$y_{abs14\ ky} = \frac{2070}{596713}$$

$$y_{abs14\ ky} = 0,003469$$

4.3.4.9 Degazör Ekserji Kaybı Oranı

Degazör ekserji kaybının toplam ekserji kaybına oranı degazör ekserji kaybı oranını verir.

$$y_{degazör\ ky} = \frac{\dot{E}_{degazör\ ky}}{\sum \dot{E}_{ky}} \quad (4.225)$$

$$y_{degazör\ ky} = \frac{1016}{596713}$$

$$y_{degazör\ ky} = 0,001702$$

4.3.4.10 Kazan Besleme Pompası Ekserji Kaybı Oranı

Kazan besleme pompası ekserji kaybının toplam ekserji kaybına oranı Kazan besleme pompası ekserji kaybı oranını verir.

$$y_{kbp\ ky} = \frac{\dot{E}_{kbp\ ky}}{\sum \dot{E}_{ky}} \quad (4.226)$$

$$y_{kbp\ ky} = \frac{505,1}{596713}$$

$$y_{kbp\ ky} = 0,0008464$$

4.3.4.11 Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1 Ekserji Kaybı Oranı

YBSI1 ekserji kaybının toplam ekserji kaybına oranı YBSI1 ekserji kaybı oranını verir.

$$y_{ybs1 ky} = \frac{\dot{E}_{ybs1 ky}}{\sum \dot{E}_{ky}} \quad (4.227)$$

$$y_{ybs1 ky} = \frac{2308}{596713}$$

$$y_{ybs1 ky} = 0,003867$$

4.3.4.12 Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 2 Ekserji Kaybı Oranı

YBSI2 ekserji kaybının toplam ekserji kaybına oranı YBSI2 ekserji kaybı oranını verir.

$$y_{ybs2 ky} = \frac{\dot{E}_{ybs2 ky}}{\sum \dot{E}_{ky}} \quad (4.228)$$

$$y_{ybs2 ky} = \frac{229,7}{596713}$$

$$y_{ybs2 ky} = 0,0003849$$

Santral ekipmanları ekserji kayıp oranları tablo 4.7'de tabloda listelenmiştir.

Tablo 4.10 Santral ekipmanları ekserji kayıp oranları

Ekipman	Ekserji Kaybı (kJ/s)	Oranlar
Kazan	442126	0,7409
Türbin Grubu	130312	0,2183
Kondenser	12014	0,0201
Kondenser Tahliye Pompası	503,2	0,0008432
Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1	75,46	0,0001264
Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 2	63,77	0,0001068
Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 3	5491	0,009202
Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 4	2070	0,003469
Degazör	1016	0,001702
Kazan Besleme Pompası	505,1	0,0008464
Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1	2308	0,003867
Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 2	229,7	0,0003849
Toplam	596713	

4.4 Santralin Ekonomik Açıdan İncelenmesi

Santralin ekonomik açıdan incelenmesi sırasında tesis sabit ve değişken maliyetleri ile ekserji kayıpları kullanılarak eksergoekonomik analiz yapılmıştır.

4.4.1 Santraldeki Ekipmanların Seviyelendirilmiş Maliyetleri

Maliyet hesaplaması için gerekli olan unsurlar arasında ekipman, çalışan, sigorta gibi maliyetler de yer almaktadır. Bu maliyetlerin detayı aşağıda açıklanmaktadır:

- İlk yatırım maliyeti: Ekipman alım maliyetidir. Bir defaya mahsus harcama yapılır ve ekipman ömrü boyunca kullanılır. Ekipman ömrü bu çalışmada 20 yıldır.
- Yıllık masraflar: Ekipmanların yedek parça masrafları yıllık olarak hesaplamada yer almaktadır. Ayrıca vergiler, çalışan maaşları, sigorta harcamalarının yıllık masrafları da ekipman bazlı paylaştırılmıştır. Bu paylaşım yapılırken ekipman satın alma maliyetleri arasındaki oranlar dikkate alınmıştır.

Tablo 4.11 Santral ekipmanları ilk yatırım ve işletme maliyetleri [24]

Maliyetler				
	İlk Yatırım Maliyeti (\$)	Yıllık Vergiler, Sigorta Ve Personel Masrafı (\$)	Yedek Parça Masrafı (\$)	Seviyelendirilmiş İlk Yatırım İşletme ve Bakım Masrafı (Z) (\$/h)
Kazan	19.933.000	498.325	996.650	448,45
Türbin grubu	13.909.000	347.725	695.450	312,92
Kondenser	873.900	21.848	43.695	11,79
KTP	114.550	2.864	5.728	2,57
Degazör	198.500	4.963	9.925	4,46
KBP	251.650	6.292	12.583	5,66
ABSI-I	133.050	3.326	6.653	2,3
ABSI-II	138.100	3.453	6.905	3,12
ABSI-III	152.600	3.815	7.630	3,44
ABSI-IV	165.800	4.145	8.290	3,74
YBSI-I	181.350	4.534	9.068	4,1
YBSI-II	182.550	4.564	9.128	4,11

Yukarıda adı geçen ilk yatırım maliyeti ve yıllık masrafların, ekipmanların eksergoekonomik maliyetlerinin hesaplanmasında kullanılmak üzere, öncelikle saat bazında seviyelendirilmiş maliyetleri elde edilecektir. Seviyelendirilmiş maliyetlere ulaşabilmek için Sabit geri kazanım faktörü (CRF) kullanılarak Eskalasyonlu Seviyelendirme Faktörü (CELF) hesaplanmıştır. CELF ilk yılın başındaki harcama miktarı ile seviyelendirilmiş değer olarak kabul edilen eşit bir yıllık ödeme arasındaki ilişkiyi ifade eder.

Burada “k” değeri, Bir Değere Getirilmiş Fiyat Düzeltme Faktörü’nü belirtmektedir. “n” değeri sistemdeki ekipmanların ve sistemin ömrünü, i_{eff} ise geri ödeme oranını belirtir.

Faiz oranı %3 ($r_i=0,03$) ; yıllık düzenli artış oranı %4 ($r_n=0,04$) ; geri ödeme oranı %6 ($i_{eff}=0,06$) olarak kabul edilmiştir.

$$k = \frac{1 + r_n}{1 + i_{eff}} \quad (4.229)$$

$$CRF = \frac{i_{eff}(1 + i_{eff})^n}{(1 + i_{eff})^{n-1}} \quad (4.230)$$

$$CELF = \frac{k(1-k^n)}{(1-k)} CRF \quad (4.231)$$

$$A = \frac{CELF}{1 + r_i} \quad (4.232)$$

Çan termik santrali yıllık 6400 saat çalışmaktadır.

İlgili değerler denklemde yerlerine konularak A değeri 1,394 olarak bulunmuştur.

Aşağıda santralin tüm ekipmanları için seviyelendirilmiş maliyet hesabı yapılmıştır. Seviyelendirilmiş maliyetler hesaplanırken ekipman fiyatı saat bazlı santral ömrüne (20 yıl x 6400 saat) bölünmüştür. Yıllık masraflar da yıllık çalışma saatine (6400) bölünmüştür. Böylece saatlik maliyet değerlerine ulaşılmıştır.

Seviyelendirilmiş maliyet hesaplaması denklemi aşağıdaki gibidir.

Bu denklemde YM_i : İlk yatırım maliyeti (\$)

PM : Yıllık vergiler sigorta ve personel masrafı (\$)

YP : Yedek Parça Masrafı (\$)

n_y : Santralin kaç yıl çalışacağı (yıl)

h_y : Santralin 1 senede kaç saat çalışacağı (saat)

$$\dot{Z}_{kazan} = \left(\frac{YM_i}{(n_y \cdot h_y)} + \frac{PM + YP}{h_y} \right) \cdot A \quad (4.233)$$

4.4.1.1 Buhar Kazanı Seviyelendirilmiş Maliyet Hesaplaması

$$\dot{Z}_{kazan} = \left(\frac{19933000}{(20 \cdot 6400)} + \frac{498325+996650}{6400} \right) \cdot 1,394$$

$$\dot{Z}_{kazan} = 542,9 \$/saat$$

4.4.1.2 Türbin Grubu Seviyelendirilmiş Maliyet Hesaplaması

$$\dot{Z}_{türbin\ grubu} = \left(\frac{13909000}{(20 \cdot 6400)} + \frac{347725+695450}{6400} \right) \cdot 1,394$$

$$\dot{Z}_{türbin\ grubu} = 378,8 \$/saat$$

4.4.1.3 Kondenser Seviyelendirilmiş Maliyet Hesaplaması

$$\dot{Z}_{kondenser} = \left(\frac{873900}{(20 \cdot 6400)} + \frac{21848 + 43695}{6400} \right) \cdot 1,394$$

$$\dot{Z}_{kondenser} = 23,8 \$/saat$$

4.4.1.4 Kondenser Tahliye Pompası Seviyelendirilmiş Maliyet Hesaplaması

$$\dot{Z}_{KTP} = \left(\frac{114550}{(20 \cdot 6400)} + \frac{2864 + 5728}{6400} \right) \cdot 1,394$$

$$\dot{Z}_{KTP} = 3,12 \text{ \$/saat}$$

4.4.1.5 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcıları Seviyelendirilmiş Maliyet Hesaplaması

$$\dot{Z}_{ABSI1} = \left(\frac{133050}{(20 \cdot 6400)} + \frac{3326 + 6653}{6400} \right) \cdot 1,394$$

$$\dot{Z}_{ABSI1} = 3,624 \text{ \$/saat}$$

$$\dot{Z}_{ABSI2} = \left(\frac{138100}{(20 \cdot 6400)} + \frac{3453 + 6905}{6400} \right) \cdot 1,394$$

$$\dot{Z}_{ABSI2} = 3,761 \text{ \$/saat}$$

$$\dot{Z}_{ABSI3} = \left(\frac{152600}{(20 \cdot 6400)} + \frac{3815 + 7630}{6400} \right) \cdot 1,394$$

$$\dot{Z}_{ABSI3} = 4,156 \text{ \$/saat}$$

$$\dot{Z}_{ABSI4} = \left(\frac{165800}{(20 \cdot 6400)} + \frac{4145 + 8290}{6400} \right) \cdot 1,394$$

$$\dot{Z}_{ABSI4} = 4,515 \text{ \$/saat}$$

4.4.1.6 Degazör Seviyelendirilmiş Maliyet Hesaplaması

$$\dot{Z}_{Degazör} = \left(\frac{198500}{(20 \cdot 6400)} + \frac{9925 + 4963}{6400} \right) \cdot 1,394$$

$$\dot{Z}_{Degazör} = 5,406 \text{ \$/saat}$$

4.4.1.7 Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcıları Seviyelendirilmiş Maliyet Hesaplaması

$$\dot{Z}_{YBSI-I} = \left(\frac{181350}{(20 \cdot 6400)} + \frac{4534 + 9068}{6400} \right) \cdot 1,394$$

$$\dot{Z}_{YBSI-I} = 4,939 \text{ \$/saat}$$

$$\dot{Z}_{YBSI-II} = \left(\frac{182550}{(20 \cdot 6400)} + \frac{4564 + 9128}{6400} \right) \cdot 1,394$$

$$\dot{Z}_{YBSI-II} = 4,972 \text{ \$/saat}$$

4.4.1.8 Kazan Besleme Pompası Seviyelendirilmiş Maliyet Hesaplaması

$$\dot{Z}_{KBP} = \left(\frac{251650}{(20 \cdot 6400)} + \frac{6292 + 12583}{6400} \right) \cdot 1,394$$

$$\dot{Z}_{KBP} = 6,854 \text{ \$/saat}$$

4.4.2 Santraldeki Ekipmanların Eksergoekonomik Parametreleri

Bu bölümde akım birim ekserji maliyeti, ekipmanların kayıp ekserji maliyetleri ve eksergoekonomik faktörleri hesaplanmıştır.

4.4.2.1 Buhar Kazanı Eksergoekonomik Analizi

Buhar kazanı eksergoekonomik analizi için maliyet denge denklemi aşağıdaki gibidir. Seviyelendirilmiş maliyet \\$/saat bazında elde edildiği için diğer bilgiler de 3600 ile çarpılarak saat karşılığına ulaşıldı.

$$\begin{aligned} & (E_{yakıt} \times c_{yakıt} \times 3600) + (E_{yakma\ havası} \times c_{yakma\ havası} \times 3600) \\ & \quad + \dot{E}_{16}^{PH+CH} \times c_{16} \times 3600 + \dot{E}_{21}^{PH+CH} \times c_{21} \times 3600 + z_{kazan} \\ = & E_{baca\ gazı} \times c_{baca\ gazı} \times 3600 + \dot{E}_{17}^{PH+CH} \times c_{17} \times 3600 \\ & \quad + \dot{E}_{22}^{PH+CH} \times c_{22} \times 3600 \end{aligned}$$

- Cyakıt değerinin hesaplanması:

Seviyelendirilmiş maliyetleri \\$/saat bazında hesaplandı Bu doğrultuda ilerlerken saatte yakılan kömür fiyatı (sykf) değerine ulaşılması için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır:

- 1 kg linyit = 0,01475 dolar
- 1 saniyede yakılan kömür miktarı = 35,71 kg

$$saate\ yakılan\ kömür\ fiyatı = sykf = 35,71 \times 3600 \times 0,01475$$

$$sykf = 1896 \$$$

$$c_{yakıt} = \frac{sykf}{(E_{yakıt} \times 3600)} \quad (4.234)$$

$$c_{yakıt} = \frac{1896}{(653011 \times 3600)}$$

$$c_{yakıt} = 8,067 \times 10^{-7} \frac{\$}{kj}$$

- $c_{\text{Baca gazı}}$ değerinin hesaplanması:

Baca gazı birim ekserji maliyeti yakıtın birim ekserji maliyetine eşittir.

$$c_{yakıt} = c_{\text{Baca gazı}} = 8,067 \times 10^{-7} \frac{\$}{kj}$$

- $c_{\text{Yakma havası}}$ değerinin hesaplanması:

Yakma havası birim ekserji maliyeti 0 alınmıştır.

$$c_{\text{Yakma havası}} = 0 \frac{\$}{kj}$$

- Akımların birim ekserji maliyeti değerinin hesaplanması:

Kazana giren su ve çıkan buhar aynı hattın ürünü olduğu için bu akımların maliyetleri birbirine eşittir.

$$c_{16} = c_{17} = c_{21} = c_{22}$$

Elde edilen değerler kazan maliyet denge denkleminde yerleştirilerek akımların birim ekserji maliyetlerine ulaşılabacaktır. Detayları aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} & 653011 \times 8,067 \times 10^{-7} \times 3600 + 0 + 32952 \times c_{16} \times 3600 \\ & \quad + 128138 \times c_{21} \times 3600 + z_{\text{kazan}} \\ & = 54862 \times 8,067 \times 10^{-7} \times 3600 + 190084 \times c_{17} \times 3600 \\ & \quad + 159890 \times c_{22} \times 3600 \end{aligned}$$

$$c_{16} = c_{17} = c_{21} = c_{22} = 1,423 \times 10^{-6}$$

- Buhar kazanı için kayıp ekserji maliyeti değerinin hesaplanması:

$$c_{kazan\ ky} = c_{yakıt} \times \frac{\dot{E}_{yakıt}}{(\dot{E}_{yakıt} + \dot{E}_{baca\ gazı})} + c_{baca\ gazı} \times \frac{\dot{E}_{baca\ gazı}}{(\dot{E}_{yakıt} + \dot{E}_{baca\ gazı})} \quad (4.235)$$

$$c_{kazan\ ky} = c_{yakıt} = 8,067 \times 10^{-7} \frac{\$}{kj}$$

$$\dot{C}_{kazan\ ky} = c_{kazan\ ky} \dot{E}_{kazan\ ky} \quad (4.236)$$

$$\dot{C}_{kazan\ ky} = 8,067 \cdot 10^{-7} \cdot 442126.3600$$

$$\dot{C}_{kazan\ ky} = 1284 \text{ \$/saat}$$

- Eksergoekonomik faktor:

$$f_{kazan} = \frac{\dot{Z}_{kazan}}{\dot{Z}_{kazan} + \dot{C}_{kazan\ ky}} \quad (4.237)$$

$$f_{kazan} = \frac{542,9}{542,9 + 1284}$$

$$f_{kazan} = 0,2972$$

4.4.2.2 Türbin Grubu Eksergoekonomik Analizi

Türbin grubu buhar giriş ve çıkış akımları birim ekserji maliyetleri birbirine eşittir. Buna göre:

$$c_{17} = c_{22} = c_{29} = c_{18} = c_{23} = c_{25} = c_{27} = c_{30} = c_{32} = c_{34} = c_{36}$$

Buhar kazanı analizi sırasında c_{17} değeri $1,423 \times 10^{-6}$ olarak bulunmuştu. Bu nedenle yukarıda listelenen tüm akımların birim ekserji maliyetleri de bu değere eşittir.

Türbin grubu maliyet denge denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} & \dot{E}_{17}^{FE+KE} c_{17} 3600 + \dot{E}_{22}^{FE+KE} c_{22} 3600 + \dot{E}_{29}^{FE+KE} c_{29} 3600 + Z_{türbin} \\ & = \dot{E}_{18}^{FE+KE} c_{18} 3600 + \dot{E}_{30}^{FE+KE} c_{30} 3600 + \dot{E}_{32}^{FE+KE} c_{32} 3600 \\ & \quad + \dot{E}_{34}^{FE+KE} c_{34} 3600 + \dot{E}_{36}^{FE+KE} c_{36} 3600 + c_{wt} \dot{E}_{wt} 3600 \end{aligned}$$

$$\dot{E}_{wt} = W_{türbin} + \dot{E}_{türbin\ ky} \quad (4.238)$$

$$\dot{E}_{wt} = 128000 + 130312$$

$$\dot{E}_{wt} = 258312$$

$$190084.1,423.10^{-6}.3600 + 159890.1,423.10^{-6}.3600$$

$$+ 82072.1,423.10^{-6}.3600 + 378,8$$

$$= 136561.1,423.10^{-6}.3600 + 3907.1,423.10^{-6}.3600$$

$$+ 965,6.1,423.10^{-6}.3600 + 642.1,423.10^{-6}.3600$$

$$+ 12458.1,423.10^{-6}.3600 + c_{wt}.258312.3600$$

$$c_{wt} = 1,83.10^{-6} \$/kj$$

- Türbin grubu kayıp ekserji maliyeti:

$$\dot{C}_{türbin\ ky} = c_{türbin\ ky} \dot{E}_{türbin\ ky} \quad (4.239)$$

$$\dot{C}_{türbin\ ky} = 1,423 \times 10^{-6}.130312.3600$$

$$\dot{C}_{türbin\ ky} = 667,4 \$/saat$$

- Eksergoekonomik faktör:

$$f_{türbin} = \frac{\dot{Z}_{türbin}}{\dot{Z}_{türbin} + \dot{C}_{türbin\ ky}} \quad (4.240)$$

$$f_{türbin} = \frac{378,8}{378,8 + 667,4}$$

$$f_{türbin} = 0,3621$$

4.4.2.3 Kondenser Eksergoekonomik Analizi

Kondenser buhar giriş ve çıkış akımlarının birim ekserji maliyetleri birbirine eşittir.

Buna göre:

$$c_1 = c_3 = c_{36}$$

Türbin grubu analizi sırasında c_{36} değeri $1,423 \times 10^{-6}$ olarak bulunmuştu. Bu nedenle yukarıda listelenen tüm akımların birim ekserji maliyetleri de bu değere eşittir.

Kondenser maliyet denge denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} & \dot{E}_{36}^{FE+KE} c_{36} 3600 + \dot{E}_{S4}^{FE+KE} c_{S4} 3600 + z_{kondenser} \\ & = \dot{E}_1^{FE+KE} c_1 3600 + \dot{E}_3^{FE+KE} c_3 3600 + \dot{E}_{S5}^{FE+KE} c_{S5} 3600 \end{aligned}$$

Kondensere giren ve çıkan soğutma suyu aynı hattın ürünü olduğu için bu akımların birim ekserji maliyetleri birbirine eşittir. Buna göre:

$$c_{S4} = c_{S5}$$

$$12458.1,423.10^{-6}.3600 + 0 c_{S4} 3600 + 23,8$$

$$= 426,7.1,423.10^{-6}.3600 + 17,96.1,423.10^{-6}.3600 + 18203 c_{S5} 3600$$

$$c_{S5} = 1,305.10^{-6} \$/kj$$

- Kondenser kayıp ekserji maliyeti:

$$\dot{C}_{kondenser\ ky} = c_{kondenser\ ky} \dot{E}_{kondenser\ ky} \quad (4.241)$$

$$\dot{C}_{kondenser\ ky} = 1,423 \times 10^{-6} . 12014 . 3600$$

$$\dot{C}_{kondenser\ ky} = 61,53 \$/saat$$

- Eksergoekonomik faktor:

$$f_{kondenser} = \frac{\dot{Z}_{kondenser}}{\dot{Z}_{kondenser} + \dot{C}_{kondenser\ ky}} \quad (4.242)$$

$$f_{kondenser} = \frac{23,8}{23,8 + 61,53}$$

$$f_{kondenser} = 0,2789$$

4.4.2.4 Kondenser Tahliye Pompası Eksergoekonomik Analizi

Kondenser tahliye pompası buhar giriş ve çıkış akımları birim ekserji maliyetleri birbirine eşittir. Buna göre:

$$c_1 = c_2$$

Kondenser analizi sırasında c_1 değeri $1,423 \times 10^{-6}$ olarak bulunmuştur. Bu nedenle yukarıda listelenen tüm akımların birim ekserji maliyetleri de bu değere eşittir.

$$\begin{aligned}
& \dot{E}_1^{FE+KE} c_1 3600 + \dot{E}_{ktp\ ky} c_{wt} 3600 + z_{ktp} \\
& = \dot{E}_2^{FE+KE} c_2 3600 + E_{ky,ktp} c_{ky,ktp} \\
& 426,7.1,423.10^{-6}.3600 + 503,2.1,83.10^{-6}.3600 + 3,12 \\
& = 488,3.1,423.10^{-6}.3600 + c_{ktp\ ky} \dot{E}_{ktp\ ky}
\end{aligned}$$

- Kondenser tahliye pompası kayıp ekserji maliyeti:

$$\dot{C}_{ktp\ ky} = c_{ktp\ ky} \dot{E}_{ktp\ ky} \quad (4.243)$$

$$\begin{aligned}
\dot{C}_{ktp\ ky} & = (426,7.1,423.10^{-6}.3600 + 503,2.1,83.10^{-6}.3600 + 3,12) \\
& \quad - (488,3.1,423.10^{-6}.3600)
\end{aligned}$$

$$\dot{C}_{ktp\ ky} = 6,119 \$/saat$$

- Eksergoekonomik faktör:

$$f_{ktp} = \frac{\dot{Z}_{ktp}}{\dot{Z}_{ktp} + \dot{C}_{ktp\ ky}} \quad (4.244)$$

$$f_{ktp} = \frac{3,12}{3,12 + 6,119}$$

$$f_{ktp} = 0,3377$$

4.4.2.5 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1 Eksergoekonomik Analizi

Alçak basınç besleme suyu ısıtıcısındaki akımların birim ekserji maliyetleri birbirine eşittir. Buna göre:

$$c_2 = c_4 = c_5 = c_{35}$$

Kondenser tahliye pompası analizi sırasında c_2 değeri $1,423 \times 10^{-6}$ olarak bulunmuştu. Bu nedenle yukarıda listelenen tüm akımların birim ekserji maliyetleri de bu değere eşittir.

$$\begin{aligned}
& \dot{E}_{35}^{FE+KE} c_{35} 3600 + \dot{E}_3^{FE+KE} c_3 3600 + \dot{E}_2^{FE+KE} c_2 3600 + \dot{E}_5^{FE+KE} c_5 3600 \\
& + z_{abs1} = \dot{E}_4^{FE+KE} c_4 3600 + E_{abs1\ ky} c_{abs1\ ky} \\
& 630,7.1,423.10^{-6}.3600 + 17,96.1,423.10^{-6}.3600 + 488,3.1,423.10^{-6}.3600 \\
& \quad + 35,67.1,423.10^{-6}.3600 + 3,624
\end{aligned}$$

$$= 1097.1,423. 10^{-6}. 3600 + E_{abs1\ ky}c_{abs1\ ky}$$

- Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1 kayıp ekserji maliyeti:

$$\dot{C}_{abs1\ ky} = c_{abs1\ ky} \dot{E}_{abs1\ ky} \quad (4.245)$$

$$\begin{aligned} \dot{C}_{abs1\ ky} &= (630,7.1,423. 10^{-6}. 3600 + 17,97.1,423. 10^{-6}. 3600 + \\ &488,3.1,423. 10^{-6}. 3600 + 35,67.1,423. 10^{-6}. 3600 + 3,624) - \\ &(1097.1,423. 10^{-6}. 3600) \end{aligned}$$

$$\dot{C}_{abs1\ ky} = 4,01 \$/saat$$

- Eksergoekonomik faktor:

$$f_{abs1} = \frac{\dot{Z}_{abs1}}{\dot{Z}_{abs1} + \dot{C}_{abs1\ ky}} \quad (4.246)$$

$$f_{abs1} = \frac{3,624}{3,624 + 4,01}$$

$$f_{abs1} = 0,4747$$

4.4.2.6 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 2 Eksergoekonomik Analizi

$$c_4 = c_6 = c_{32} = c_{33}$$

$$\begin{aligned} &\dot{E}_{33}^{FE+KE} c_{33} 3600 + \dot{E}_4^{FE+KE} c_4 3600 + z_{abs12} \\ &= \dot{E}_6^{FE+KE} c_6 3600 + \dot{E}_5^{FE+KE} c_5 3600 + E_{abs12\ ky}c_{abs12\ ky} \\ &947,2 . 1,423. 10^{-6} . 3600 + 1097 . 1,423. 10^{-6} . 3600 + 3,761 \\ &= 1945 . 1,423. 10^{-6} 3600 + 35,67 . 1,423. 10^{-6} . 3600 \\ &+ E_{abs12\ ky}c_{abs12\ ky} \end{aligned}$$

- Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 2 kayıp ekserji maliyeti:

$$\dot{C}_{abs12\ ky} = E_{abs12\ ky}c_{abs12\ ky} \quad (4.247)$$

$$\dot{C}_{abs12\ ky} = E_{abs12\ ky}c_{abs12\ ky}$$

$$\dot{C}_{abs12\ ky} = (947,2 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 + 1097 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 + 3,761) - (1945 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 + 35,67 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600)$$

$$\dot{C}_{abs12\ ky} = 4,088 \text{ \$/saat}$$

- Eksergoekonomik faktör:

$$f_{abs12} = \frac{\dot{Z}_{abs12}}{\dot{Z}_{abs12} + \dot{C}_{abs12\ ky}} \quad (4.247)$$

$$f_{abs12} = \frac{3,761}{3,761 + 4,088}$$

$$f_{abs12} = 0,4792$$

4.4.2.7 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 3 Eksergoekonomik Analizi

$$c_6 = c_7 = c_8 = c_9 = c_{30} = c_{31}$$

$$\dot{E}_{31}^{FE+KE} c_{31} 3600 + \dot{E}_6^{FE+KE} c_6 3600 + \dot{E}_9^{FE+KE} c_9 3600 + Z_{abs13}$$

$$= \dot{E}_7^{FE+KE} c_7 3600 + E_{abs13\ ky} c_{abs13\ ky}$$

$$3863 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 + 1945 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600$$

$$+ 376,4 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 + 4,156$$

$$= 693,3 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 + E_{abs13\ ky} c_{abs13\ ky}$$

- Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 3 kayıp ekserji maliyeti:

$$\dot{C}_{abs13\ ky} = E_{abs13\ ky} c_{abs13\ ky} \quad (4.248)$$

$$\dot{C}_{abs13\ ky} = (3863 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 + 1945 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 +$$

$$376,4 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 + 4,156) - (693,3 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600)$$

$$\dot{C}_{abs13\ ky} = 32,28 \text{ \$/saat}$$

- Eksergoekonomik faktör:

$$f_{abs13} = \frac{\dot{Z}_{abs13}}{\dot{Z}_{abs13} + \dot{C}_{abs13\ ky}} \quad (4.249)$$

$$f_{abs13} = \frac{4,156}{4,156 + 32,28}$$

$$f_{abs13} = 0,1141$$

4.4.2.8 Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 4 Eksergoekonomik Analizi

$$c_8 = c_{10} = c_{27} = c_{28}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{28}^{FE+KE} c_{28} 3600 + \dot{E}_8^{FE+KE} c_8 3600 + z_{abs14} \\ = \dot{E}_{10}^{FE+KE} c_{10} 3600 + \dot{E}_9^{FE+KE} c_9 3600 + E_{abs14\ ky} c_{abs14\ ky} \\ 5316 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 + 7006 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 + 4,515 \\ = 9875 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 + 376,4 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 \\ + E_{abs14\ ky} c_{abs14\ ky} \end{aligned}$$

- Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 4 kayıp ekserji maliyeti:

$$\dot{C}_{abs14\ ky} = E_{abs14\ ky} c_{abs14\ ky} \quad (4.250)$$

$$\begin{aligned} \dot{C}_{abs14\ ky} &= (5316 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 + 7006 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 + 4,515) - \\ &(9875 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 + 376,4 \cdot 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot 3600) \end{aligned}$$

$$\dot{C}_{abs14\ ky} = 15,12 \text{ \$/saat}$$

- Eksergoekonomik faktör:

$$f_{abs14} = \frac{\dot{Z}_{abs14}}{\dot{Z}_{abs14} + \dot{C}_{abs14\ ky}} \quad (4.251)$$

$$f_{abs14} = \frac{4,515}{4,515 + 15,12}$$

$$f_{abs14} = 0,23$$

4.4.2.9 Degazör Eksergoekonomik Analizi

$$c_{10} = c_{11} = c_{12} = c_{13} = c_{25} = c_{26}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{10}^{FE+KE} c_{10} 3600 + \dot{E}_{26}^{FE+KE} c_{26} 3600 + \dot{E}_{13}^{FE+KE} c_{13} 3600 + z_{degazör} \\ = \dot{E}_{11}^{FE+KE} c_{11} 3600 + \dot{E}_{12}^{FE+KE} c_{12} 3600 + E_{degazör\ ky} c_{degazör\ ky} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 9875.1,423.10^{-6} \cdot 3600 + 5277.1,423.10^{-6} \cdot 3600 + 989,9 \cdot 1,423.10^{-6} \cdot 3600 \\
& + 5,406 \\
& = 17159.1,423.10^{-6} \cdot 3600 + 17866.1,423.10^{-6} \cdot 3600 \\
& + E_{degazör\ ky} C_{degazör\ ky}
\end{aligned}$$

- Degazör kayıp ekserji maliyeti:

$$\dot{C}_{degazör\ ky} = E_{degazör\ ky} C_{degazör\ ky} \quad (4.252)$$

$$\begin{aligned}
\dot{C}_{degazör\ ky} &= (9875.1,423.10^{-6} \cdot 3600 + 5277.1,423.10^{-6} \cdot 3600 + \\
& 989,9 \cdot 1,423.10^{-6} \cdot 3600 + 5,406) - (17159.1,423.10^{-6} \cdot 3600 + \\
& 17866.1,423.10^{-6} \cdot 3600)
\end{aligned}$$

$$\dot{C}_{degazör\ ky} = 91,03 \text{ \$/saat}$$

- Eksergoekonomik faktör:

$$f_{degazör} = \frac{\dot{Z}_{degazör}}{\dot{Z}_{degazör} + \dot{C}_{degazör\ ky}} \quad (4.253)$$

$$f_{degazör} = \frac{5,406}{5,406 + 91,03}$$

$$f_{degazör} = 0,056$$

4.4.2.10 Kazan Besleme Pompası Eksergoekonomik Analizi

$$c_{11} = c_{12}$$

$$\begin{aligned}
& \dot{E}_{11}^{FE+KE} c_{11} 3600 + \dot{E}_{kbp\ ky} c_{wt} 3600 + z_{kbp} \\
& = \dot{E}_{12}^{FE+KE} c_{12} 3600 + E_{ky,kbp} c_{ky,kbp} \\
& 17159.1,423.10^{-6} \cdot 3600 + 505,1 \cdot 1,83.10^{-6} \cdot 3600 + 6,854 \\
& = 17866.1,423.10^{-6} \cdot 3600 + E_{kbp\ ky} C_{kbp\ ky}
\end{aligned}$$

- Kazan besleme pompası kayıp ekserji maliyeti:

$$\dot{C}_{kbp\ ky} = c_{ky,kbp} \dot{E}_{kbp\ ky} \quad (4.254)$$

$$\dot{C}_{kbp\ ky} = (17159.1,423.10^{-6} \cdot 3600 + 505,1 \cdot 1,83.10^{-6} \cdot 3600 + 6,854) - (17866.1,423.10^{-6} \cdot 3600)$$

$$\dot{C}_{kbp\ ky} = 6,56 \text{ \$/saat}$$

- Eksergoekonomik faktör:

$$f_{kbp} = \frac{\dot{Z}_{ktp}}{\dot{Z}_{ktp} + \dot{C}_{kbp\ ky}} \quad (4.255)$$

$$f_{kbp} = \frac{6,854}{6,854 + 6,56}$$

$$f_{kbp} = 0,511$$

4.4.2.11 Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1 Eksergoekonomik Analizi

$$c_{12} = c_{14} = c_{15} = c_{23} = c_{24}$$

$$\begin{aligned} & \dot{E}_{24}^{FE+KE} c_{24} 3600 + \dot{E}_{12}^{FE+KE} c_{12} 3600 + \dot{E}_{15}^{FE+KE} c_{15} 3600 + Z_{ybs11} \\ & = \dot{E}_{14}^{FE+KE} c_{14} 3600 + \dot{E}_{13}^{FE+KE} c_{13} 3600 + E_{ybs11\ ky} C_{ybs11\ ky} \\ & 7883.1,423.10^{-6} \cdot 3600 + 17866 \cdot 1,423.10^{-6} \cdot 3600 \\ & + 1979.1,423.10^{-6} \cdot 3600 + 4,939 \\ & = 244,30.1,423.10^{-6} \cdot 3600 + 989,9.1,423.10^{-6} \cdot 3600 \\ & + E_{ybs11\ ky} C_{ybs11\ ky} \end{aligned}$$

- Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1 kayıp ekserji maliyeti:

$$\dot{C}_{ybs11\ ky} = E_{ybs11\ ky} C_{ybs11\ ky} \quad (4.256)$$

$$\begin{aligned} \dot{C}_{ybs11\ ky} & = (7883.1,423.10^{-6} \cdot 3600 + 17866 \cdot 1,423.10^{-6} \cdot 3600 \\ & + 1979.1,423.10^{-6} \cdot 3600 + 4,939) \\ & - (244,30.1,423.10^{-6} \cdot 3600 + 989,9.1,423.10^{-6} \cdot 3600) \end{aligned}$$

$$\dot{C}_{ybs11\ ky} = 16,76 \text{ \$/saat}$$

- Eksergoekonomik faktör:

$$f_{ybs11} = \frac{\dot{Z}_{ybs11}}{\dot{Z}_{ybs11} + \dot{C}_{ybs11\ ky}} \quad (4.257)$$

$$f_{ybs1} = \frac{4,939}{4,939 + 16,76}$$

$$f_{ybs1} = 0,2276$$

4.4.2.12 Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 2 Eksergoekonomik Analizi

$$c_{20} = c_{14} = c_{15} = c_{16}$$

$$\begin{aligned} & \dot{E}_{20}^{FE+KE} c_{20} 3600 + \dot{E}_{14}^{FE+KE} c_{14} 3600 + 4,972 \\ & = \dot{E}_{15}^{FE+KE} c_{15} 3600 + \dot{E}_{16}^{FE+KE} c_{16} 3600 + E_{ybs12\ ky} c_{ybs12\ ky} \\ & 10730.1,423.10^{-6} .3600 + 24430.1,423.10^{-6} .3600 + 4,972 \\ & = 1979.1,423.10^{-6} .3600 + 32952 1,423.10^{-6} .3600 \\ & + E_{ybs12\ ky} c_{ybs12\ ky} \end{aligned}$$

- Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 2 kayıp ekserji maliyeti:

$$\dot{C}_{ybs12\ ky} = E_{ybs12\ ky} c_{ybs12\ ky} \quad (4.258)$$

$$\begin{aligned} \dot{C}_{ybs12\ ky} & = (10730.1,423.10^{-6} .3600 + 24430.1,423.10^{-6} .3600 + 4,972) \\ & - (1979.1,423.10^{-6} .3600 + 32952 1,423.10^{-6} .3600) \end{aligned}$$

$$\dot{C}_{ybs12\ ky} = 6,148 \$/saat$$

- Eksergoekonomik faktör:

$$f_{ybs12} = \frac{\dot{Z}_{ybs12}}{\dot{Z}_{ybs12} + \dot{C}_{ybs12\ ky}} \quad (4.259)$$

$$f_{ybs12} = \frac{4,972}{4,972 + 6,148}$$

$$f_{ybs12} = 0,4471$$

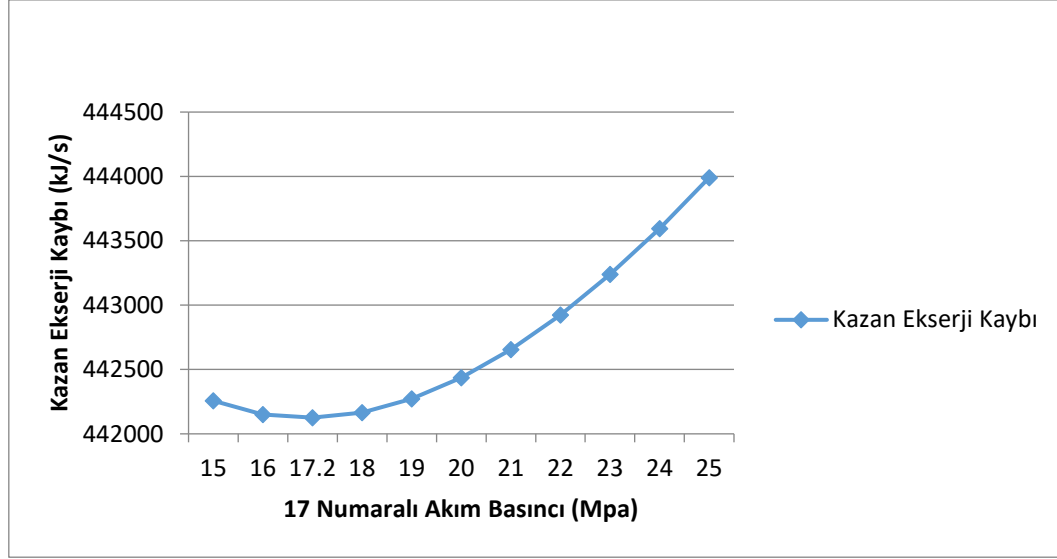
Santral ekipmanları kayıp ekserji maliyetleri tablo 4.8'de listelenmiştir.

Tablo 4.12 Santral ekipmanları kayıp ekserji maliyetleri

Ekipman	Kayıp Ekserji Maliyeti (\$/saat)	Oranlar
Kazan	1284	0,6076329
Türbin Grubu	667,4	0,3158366
Kondenser	61,53	0,0291181
Kondenser Tahliye Pompası	6,119	0,0028957
Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1	4,01	0.0018976
Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 2	4,088	0.0019346
Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 3	32,28	0.0152760
Alçak Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 4	15,12	0.0071553
Degazör	9,103	0.0043078
Kazan Besleme Pompası	6,56	0.0031044
Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 1	16,76	0.0079314
Yüksek Basınç Besleme Suyu Isıtıcısı 2	6,148	0.0029094
Toplam	2113.118	

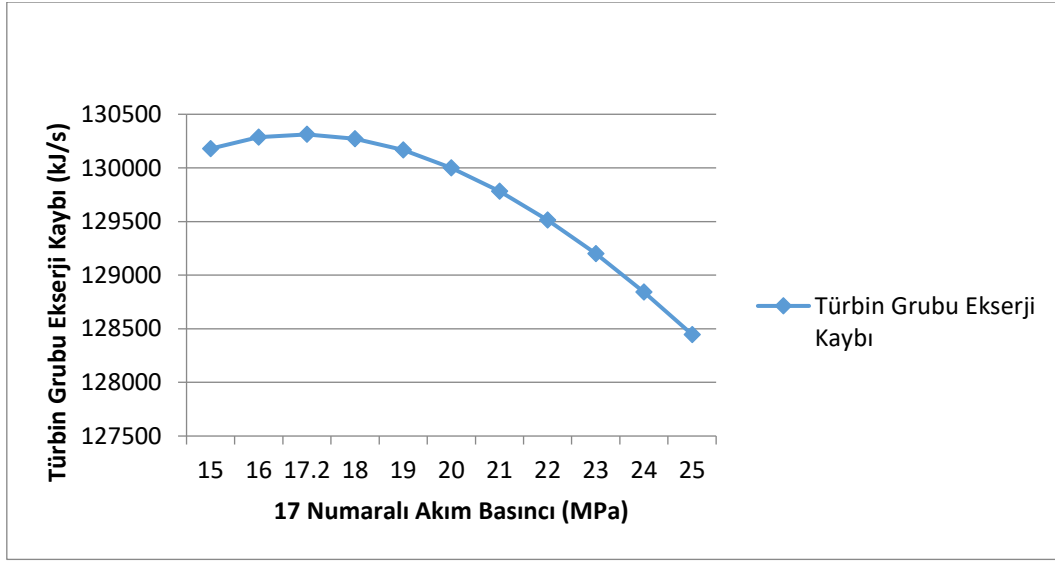
4.5 Akımların Sıcaklık ve Basınç Değerleri Değişimi ile Analiz

En yüksek ekserji kaybı ve maliyetin görüldüğü kazan ve türbin grubu ekipmanlarını ilgilendiren 17 ve 22 numaralı akımların sıcaklık ve basınç değerleri değişiminin etkilerine aşağıdan ulaşılabilmektedir.



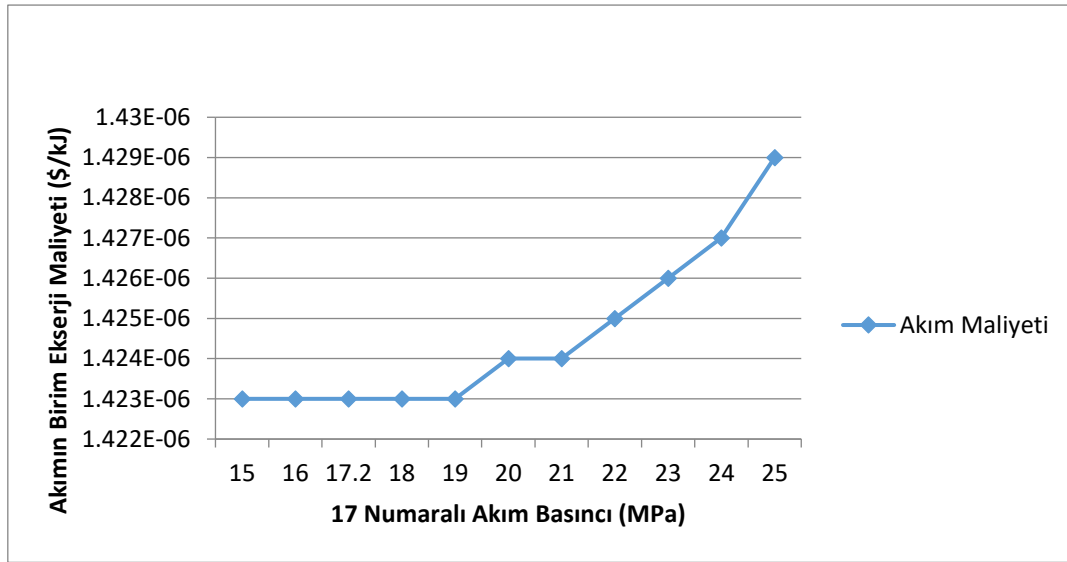
Şekil 4.17 17 numaralı akımın basıncı ve kazan ekserji kaybı değişim grafiği

17 numaralı akım için değişik basınç değerleri denenerek kazanda oluşan ekserji kaybı gözlemlendiğinde basıncın 17 seviyesinde olduğu durumda en düşük ekserji kaybının yaşandığı gözlemlenmiş bundan daha düşük veya yüksek olduğu durumda ekserji kaybında artış yaşandığı görülmüştür.



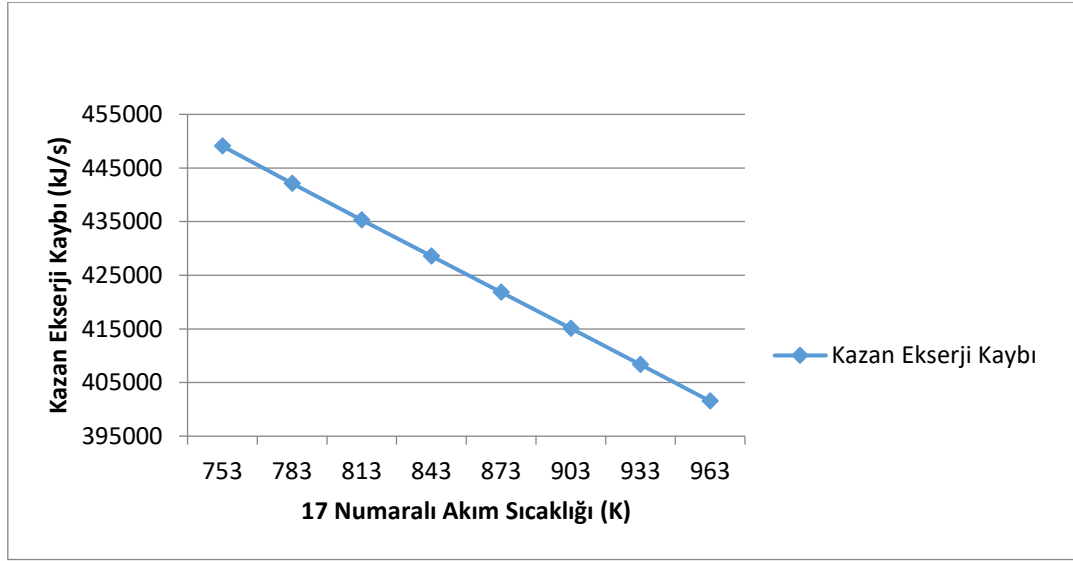
Şekil 4.18 17 numaralı akımın basıncı ve türbin grubu ekserji kaybı değişimi

17 numaralı akım için değişik basınç değerleri denenerek türbin grubunda oluşan ekserji kaybı gözlemlendiğinde basıncın 17 seviyesinde olduğu durumda en yüksek ekserji kaybının yaşandığı gözlemlenmiş bundan daha düşük veya yüksek olduğu durumda ekserji kaybında azalma yaşandığı görülmüştür.



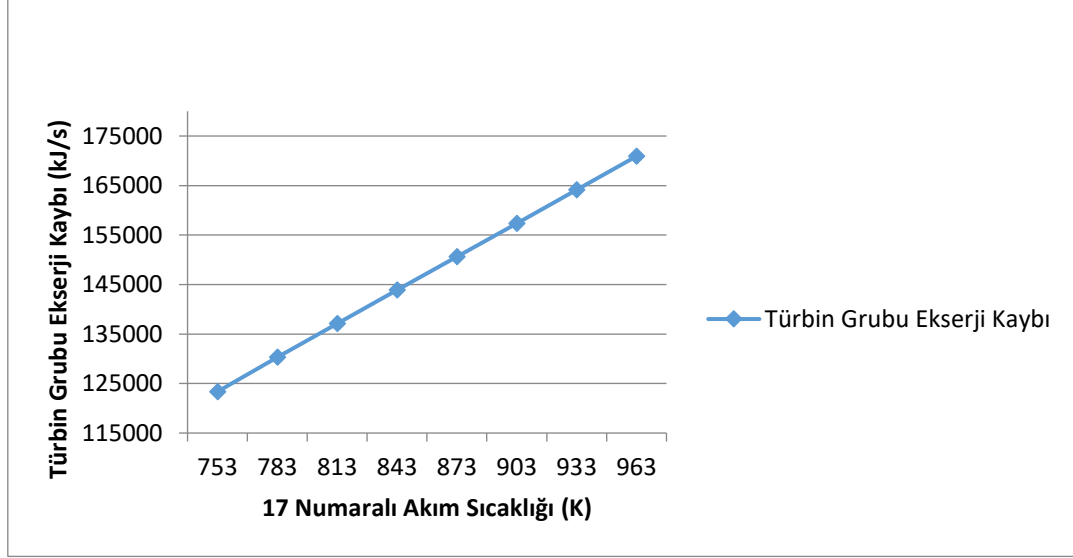
Şekil 4.19 17 numaralı akımın basıncı ve birim ekserji maliyeti değişimi

17 numaralı akım için değişik basınç değerleri denenerek akımın birim ekserji maliyetindeki değişim gözlemlendiğinde basıncın 19 MPa'a kadar çıkarıldığı durumda maliyette değişim gözlenmemekte ve denenen değerler için elde edilen en düşük maliyet seviyesinde kalmaktadır. 19'dan sonra maliyette artış gözlenmektedir. Buradaki artış doğrusal değildir.



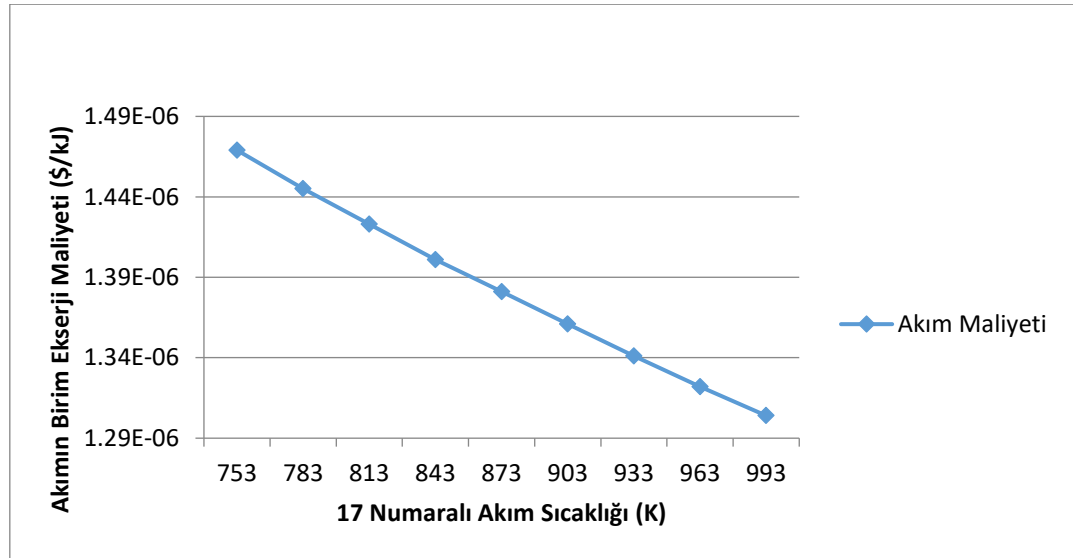
Şekil 4.20 17 numaralı akımın sıcaklığı ve kazan ekserji kaybı değişimi

17 numaralı akım için değişik sıcaklık değerleri denenerek kazanda oluşan ekserji kaybı gözlemlendiğinde sıcaklık arttığı müddetçe ekserji kaybında doğrusal bir azalma gözlenmiştir.



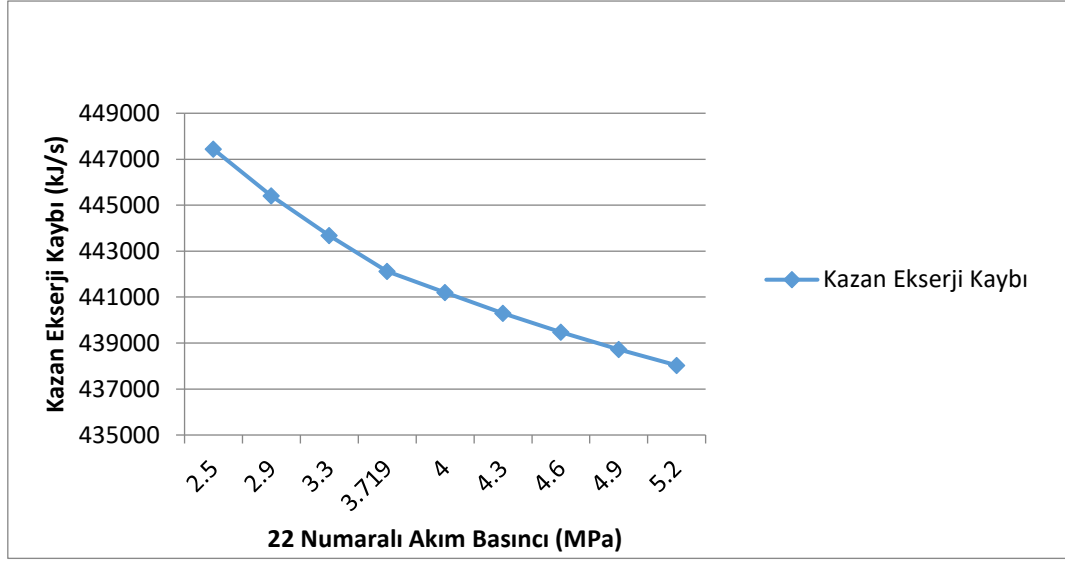
Şekil 4.21 17 numaralı akımın sıcaklığı ve türbin grubu ekserji kaybı değişimi

17 numaralı akım için değişik sıcaklık değerleri denenerek türbin grubunda oluşan ekserji kaybı gözlemlendiğinde sıcaklık arttıkça türbin grubu ekserji kaybında doğrusal bir artış olduğu gözlenmiştir.



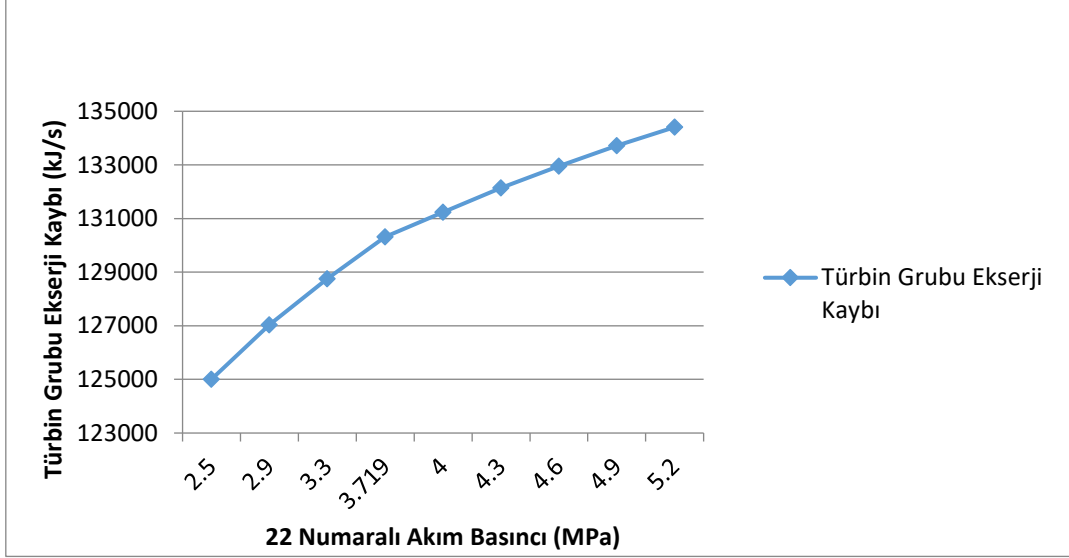
Şekil 4.22 17 numaralı akımın sıcaklığı ve akımın birim ekserji maliyeti değişimi

17 numaralı akım için değişik sıcaklık değerleri denenerek akımın birim ekserji maliyetindeki değişim gözlemlendiğinde sıcaklık arttığı sürece maliyetin azaldığı görülmektedir. Burada doğrusal bir azalma gözlenmektedir.



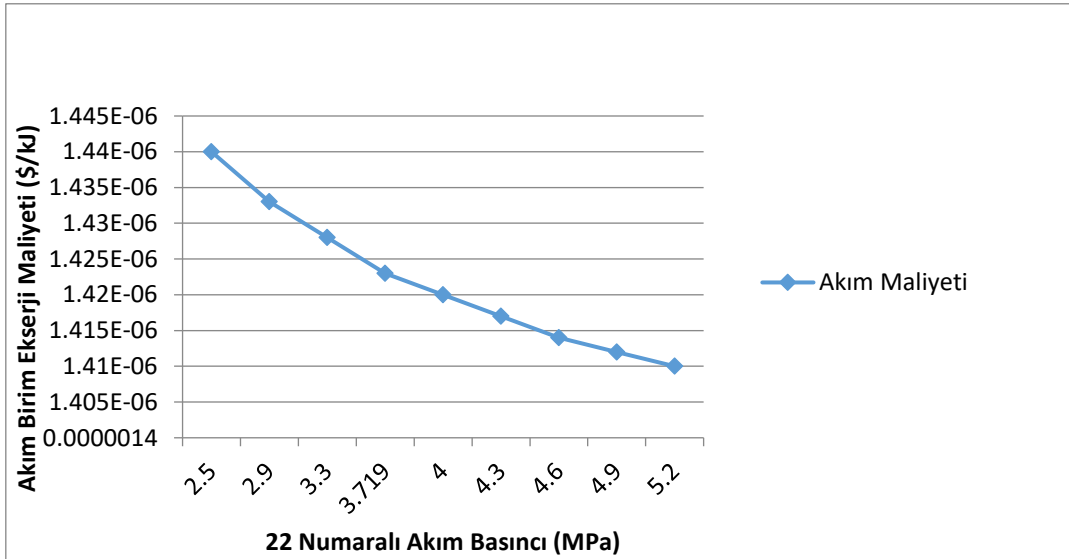
Şekil 4.23 22 numaralı akımın basıncı ve kazan ekserji kaybı değişimi

22 numaralı akım için değişik basınç değerleri denenerek kazanda oluşan ekserji kaybı gözlemlendiğinde basınç arttıkça ekserji kaybının azaldığı görülmüştür. Ancak bu azalış doğrusal değildir. Yüksek basınç değerlerinde görülen ekserji kaybı azalması düşük basınç değerlerindeki değişimden daha azdır.



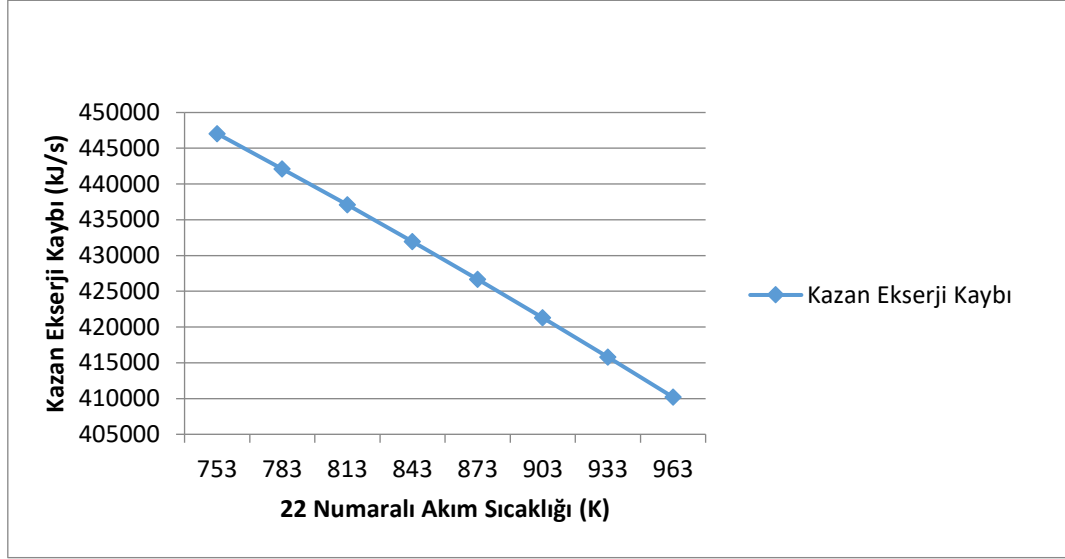
Şekil 4.24 22 numaralı akımın basıncı ve türbin grubu ekserji kaybı değişimi

22 numaralı akım için değişik basınç değerleri denenerek türbin grubunda oluşan ekserji kaybı gözlemlendiğinde basınç arttıkça ekserji kaybının da arttığı görülmüştür. Burada azalan bir artış görülmektedir.



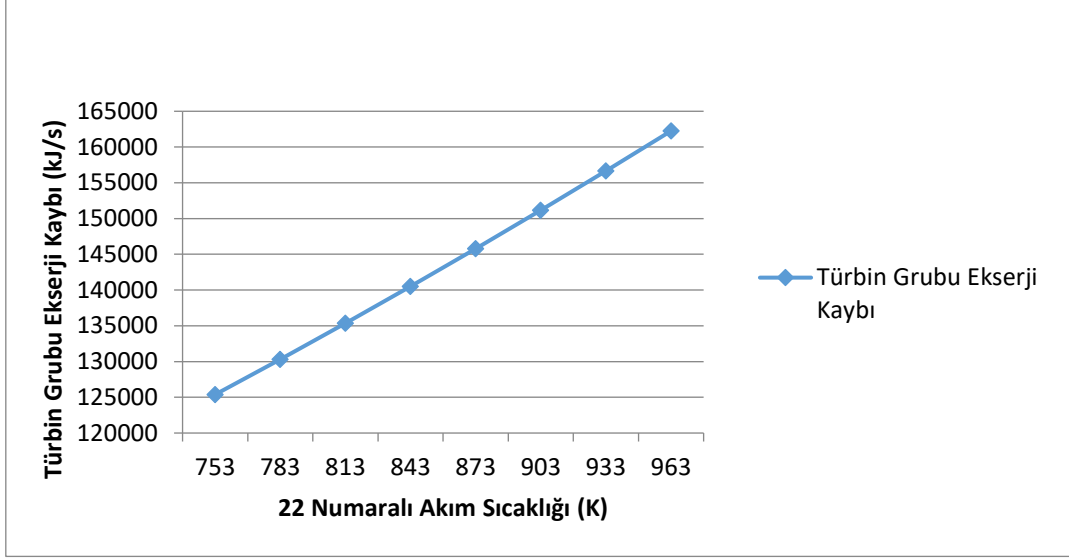
Şekil 4.25 22 numaralı akımın basıncı ve birim ekserji maliyeti değişimi

22 numaralı akım için değişik basınç değerleri denenerek akımın birim ekserji maliyetindeki değişim gözlemlendiğinde basınç arttıkça maliyetin azaldığı görülmektedir. Ancak basıncı bir birim arttırmada görülen maliyet azalışı giderek azalmaktadır.



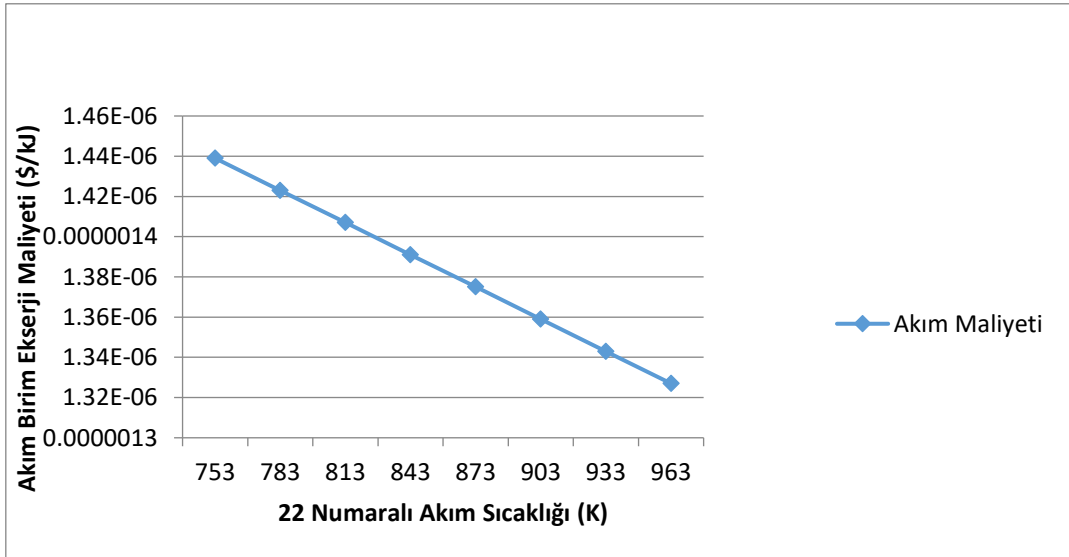
Şekil 4.26 22 numaralı akımın sıcaklığı ve kazan ekserji kaybı değişimi

22 numaralı akım için değişik sıcaklık değerleri denenerek kazanda oluşan ekserji kaybı gözlemlendiğinde sıcaklık arttıkça kazan ekserji kaybının azaldığı görülmüştür. Bu azalma doğrusala yakındır.



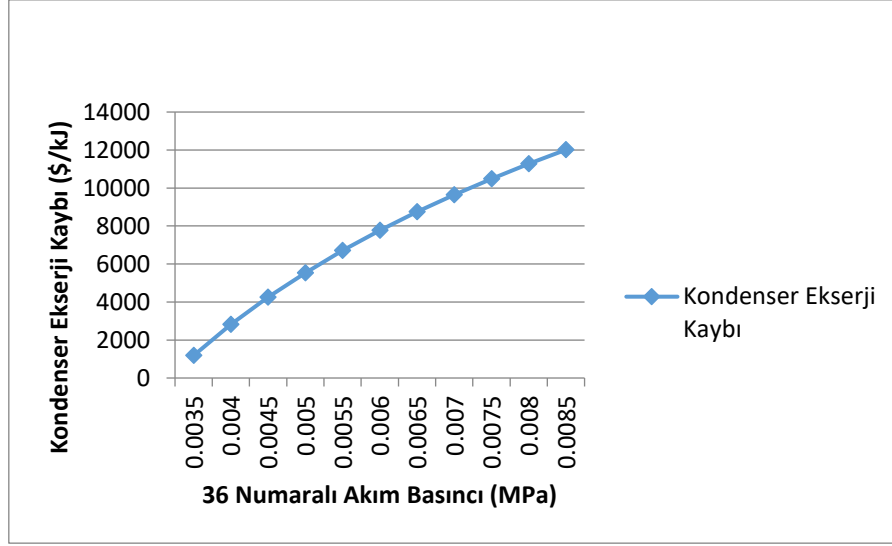
Şekil 4.27 22 numaralı akımın sıcaklığı ve türbin grubu ekserji kaybı değişimi

22 numaralı akım için değişik sıcaklık değerleri denenerek türbin grubunda oluşan ekserji kaybı gözlemlendiğinde sıcaklık arttıkça ekserji kaybının doğrusala yakın bir artış gösterdiği görülmektedir.



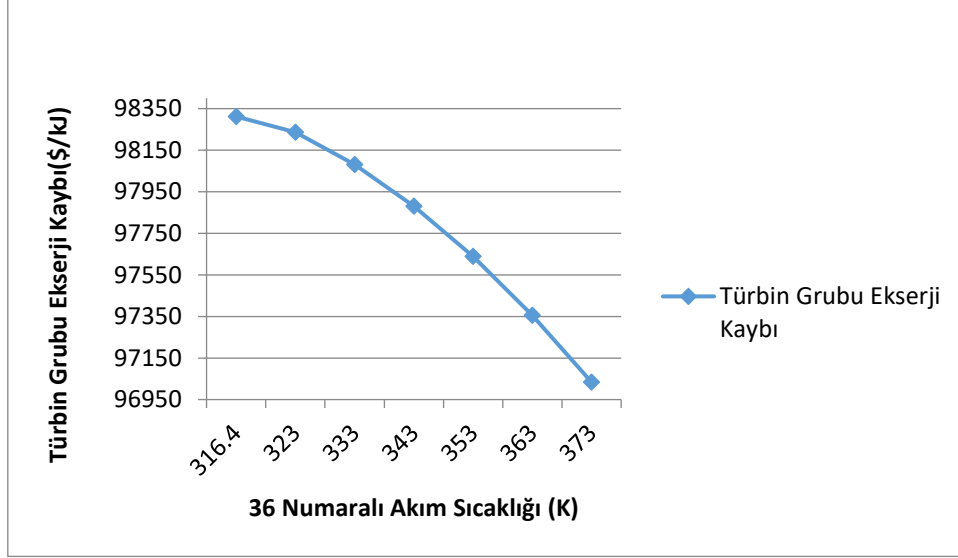
Şekil 4.28 22 numaralı akımın sıcaklığı ve birim ekserji maliyeti değişimi

22 numaralı akım için değişik sıcaklık değerleri denenerek akımın birim ekserji maliyetindeki değişim gözlemlendiğinde sıcaklık arttığı sürece maliyetin azaldığı görülmektedir. Burada doğrusal bir azalma gözlenmektedir.



Şekil 4.29 36 numaralı akımın basıncı ve kondenser ekserji kaybı değişimi

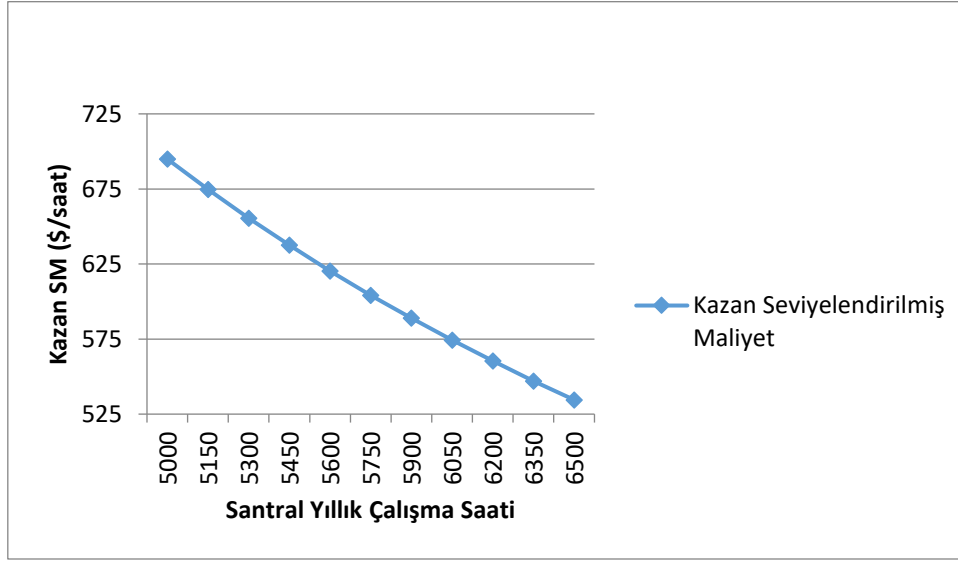
36 numaralı akım için değişik basınç değerleri denenerek kondenserde oluşan ekserji kaybı gözlemlendiğinde basınç arttıkça kondenser ekserji kaybının arttığı görülmüştür.



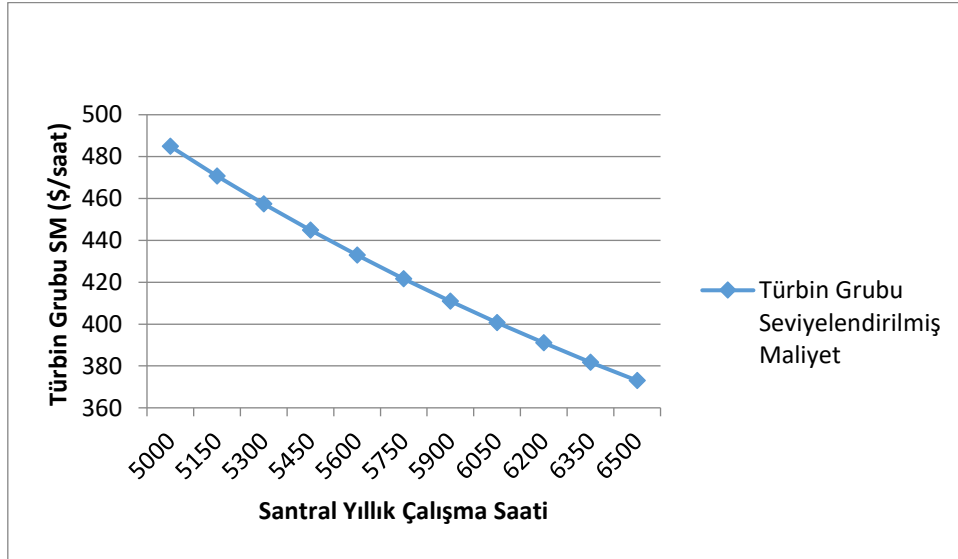
Şekil 4.30 36 numaralı akımın sıcaklığı ve kondenser ekserji kaybı değişimi

36 numaralı akım için değişik sıcaklık değerleri denenerek kondenserde oluşan ekserji kaybı gözlemlendiğinde sıcaklık arttıkça kondenser ekserji kaybının azaldığı görülmüştür.

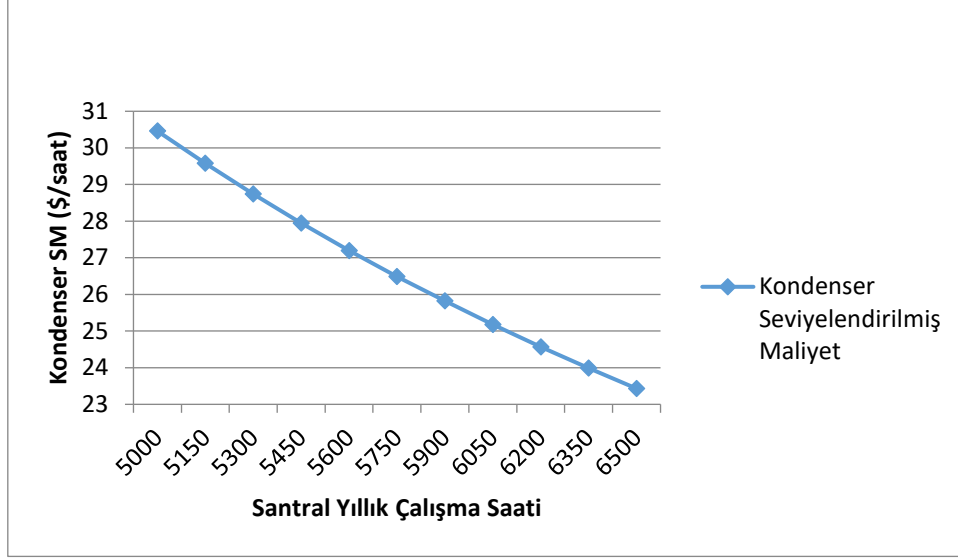
Aşağıda santralin yıllık çalışma süresi değiştirilerek kazan, türbin grubu ve kondenser için seviyelendirilmiş maliyetlerin değişimi gözlemlenmiştir. Santralin yıllık çalışma süresinin artırılması özellikle ilk yatırım maliyeti nedeniyle ekipmanların seviyelendirilmiş maliyeti düşürmektedir.



Şekil 4.31 Santral yıllık çalışma süresi ve kazan seviyelendirilmiş maliyet değişimi



Şekil 4.32 Santral yıllık çalışma süresi ve türbin grubu seviyelendirilmiş maliyet değişimi



Şekil 4.33 Santral yıllık çalışma süresi ve kondenser seviyelendirilmiş maliyet değişimi

Yukarıda verilen grafiklerde, incelenen termik santralin farklı akımları için farklı basınç ve sıcaklık değerleri verilerek ekserji kaybı ve akımların birim ekserji maliyetlerindeki değişimler gözlemlenmiştir. Bu gözlemlerde görüldüğü gibi farklı sıcaklık değerleri denemelerinde sürekli bir artış veya azalış gözlemlenip bir optimum sıcaklığa ulaşamamıştır. Basınçtaki değişim ise eğimli bir grafik vermiş olup optimum bir basınç değerine ulaşabilmektedir. Bu nedenle iyileştirmelerin sıcaklık yerine basınç değişim grafikleri üzerinden yapılması verimli sonuçlar verebilir. Bunun yanında santralin yıllık çalışma süresinin arttırılması seçeneği de değerlendirilebilir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Çan termik santralının eksergoekonomik analizi yapılmıştır. Santralin herbir bileşeni ayrı ayrı ele alınarak girdi ve çıktı değerleri üzerinden enerji ve ekserji kayıpları hesaplanmıştır. Başka bir ifade ile santral modelindeki herbir bileşen ayrı bir kontrol hacmi olarak kabul edilmiştir. Ekserji kayıplarına ulaşabilmek için yakıt, baca gazı, yakma havası ve akımların fiziksel ve kimyasal ekserji değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar doğrultusunda en yüksek toplam ekserji değerine sahip akımlar kazandan çıkan ve yüksek basınç türbinine giren 17 numaralı akım (190084 kJ/s) ile kazandan çıkan ve orta basınç türbinine giren 22 numaralı akım (159890 kJ/s) dir. Bu akımları yüksek basınç türbininden çıkan 18 numaralı akım (136561 kJ/s) takip etmektedir. Yakıt ekserjisi 424000 kJ/s iken baca gazı ekserjisi 54861kJ/s ve yakma havası ekserjisi 1626 kJ/s'dir. Ekipman ekserji kayıpları incelendiğinde en büyük kaybın 442126kJ/s ile kazanda olduğu görülmekte, kazanı 130312 kJ/s ile türbin grubu takip etmekte bunu ise 12012 kJ/s ile kondenser izlemektedir. Ekonomik analiz sırasında çeşitli kurulum ve işletim maliyetleri dikkate alınmıştır. Bunlar ekipman ilk yatırım maliyeti ile bakım, yedek parça, çalışan ve sigorta maliyetleridir. Ekipman ilk yatırım maliyetleri dışındaki maliyetler ekipman bazlı paylaştırılmıştır. Bu paylaştırma ekipman fiyatları oranları doğrultusunda yapılmıştır. Kayıp ekserji maliyetine bakıldığında da en yüksek kaybın 1284 \$/saat ile kazanda olduğu görülmekte, kazanı 667,4 \$/saat ile türbin grubu izlemektedir. Seviyelendirilmiş maliyetler hesaplandığında en yüksek maliyetin kazanda olduğu görülmüştür, bunu türbin grubu ve kondenser izlemektedir. Eksergoekonomik faktör bazlı baktığımızda ise en yüksek eksergoekonomik faktöre sahip ekipmanın türbin grubu olduğu görülmektedir. Türbin grubunu kazan ve kondenser takip etmektedir. En büyük kaybın görüldüğü yer olan kazanda yapılacak bir iyileştirme sistemin tümü üzerinde önemli etkilere sahip olacaktır.

Hem kayıp ekserji hem de kayıp ekserji maliyeti analiz sonuçları, geliştirme yapılacak ilk ekipman olarak kazanı ikinci ekipman olarak da türbin grubunu işaret etmektedir. Bu iki

analiz sıralama olarak aynı sonucu verse de değer olarak farklılık göstermektedir. Türbin grubunun ekserji kaybı kazanın kaybının 1/3'ünden daha az bir değere sahipken ekonomik analizde türbin grubunun maliyeti kazanın maliyetinin yarısı kadardır. Sadece ekserji kayıplarına baksaydık türbin grubu kazana göre çok daha az öneme sahip çıkarken ekonomik analiz ile türbin grubunun öneminin arttığı görülmüştür. Bu nedenle iyileştirme yapılırken maliyetler ve etkileri göz önünde bulundurularak türbin grubuna yönelmek de bir seçenek olabilir.

- [1] Y.A. Çengel., M.A. Boles “Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik, McGraw-Hill Literatür Ortak Yayını 1996
- [2] J.H. Horlock J.B. Young, G. Manfrida “Exergy analysis of modern fossil-fuel power plant”, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol122,1-7. 2000.
- [3] T. Derbentli “Birleşik ısı güç üretiminde kullanılan iki buhar çevriminin birinci ve ikinci kanun çözümlemesi”, Isı bilimi ve tekniği 7. Ulusal kongresi, 35-45. 1986
- [4] I. Dinçer, H. Al Muslim “Thermodynamic analysis of reheat cycle steam power plants”, International Journal Of Energy Research, Vol25, 727-739. 2001
- [5] G. Verkhivker B. Kosoy “On the exergy analysis of power plants”, Energy Conversion and Management, Vol 42 2053-2059. 2001
- [6] J. Alconchel, A. Valero, J. Abadia “Exergy simulationnof real operating steam power plant” 1985
- [7] J. Jonsten, S. Elgan, Massie “Exergy and economic analysis at a central cogeneration plan equipped with steam turbines” 621-626. 2001
- [8] A. Valero, M. Munoz, A. Lozano “A general theory of exergy saving part 1. On the exergetic cost” Computer aided engineering and energy systems Vol3. 1986
- [9] A. Valero, M. Munoz, A. Lozano “A general theory of exergy saving part 2. On the exergetic cost” Computer aided engineering and energy systems Vol3. 1986
- [10] A. Valero, M. Munoz, A. Lozano “A general theory of exergy saving part 3. On the exergetic cost” Computer aided engineering and energy systems Vol3. 1986
- [11] M.A. Lozano, A. Valero “Theory of the exergetic cost”, Energy Vol 18, No 9 939-960. 1993
- [12] A. Valero, M. Munoz, A. Lozano “A general theory of exergy saving part 2. On the exergetic cost” Computer aided engineering and energy systems Vol3. 1986

- [13] S. Kim, D. Oh, Y. Kwon, Y. Kwak "Exergoeconomic analysis of thermal systems" Energy, Vol23, No 5, 393-406. 1997
- [14] L. Attala, B. Facchini, G. Ferrera "Thermoeconomic optimization method as design tool in gas-steam combined plant realization", Energy Conversion and Management, vol 42, 2163-2172. 2001
- [15] G. Tsatsaronis, M. Park "On avoidable and unavoidable exergy destruction and investment costs in thermal system" Energy Conversion and Mangement, Vol 43, 1259-1270. 2002
- [16] A. R. Büyüktür "Termodinamik Cilt 1,2" Uludağ Üniversitesi Basımevi 1986
- [17] I. Dincer "The role of exergy in energy policy making" 2000
- [18] D. Yang, J. Wang "Methodology for exergy costing", ECOS 95, 167-172. 1995
- [19] J. Manninen, X.X. Zhu "Thermodynamic Analysis and Mathematical Optimization of Power Plants", European Symposium on Computer Aided Process Engineering, Vol 22, pp 537- 544. 1998
- [20] R. Ilgar "Çan Termik Santrali Projesi" Marmara Coğrafya Dergisi, 154-171. 2008
- [21] 18 Mart Çan Termik Santrali (2021, 28 Mart) Erişim adresi <https://www.enerjiatlasi.com/komur/18-mart-can-termik-santrali.html>
- [22] Z. Oktay "Investigation of coal-fired power plants in Turkey and a case study: Can plant" Applied Thermal Engineering, 550-557. 2008
- [23] A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. Moran "Thermal Design and Optimization", John Wiley and Sons, USA. 1996
- [24] F. Ünal, Bir Termik Santralin Ekserji Analizi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 2009
- [25] E. Özen, Ultra Süper Kritik Termik Santrallerin Termodinamik ve Ekonomik (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 2017

- [26] H.H. Erdem, A.V. Akkaya, B. Cetin, A. Dagdas, S.H. Sevilgen, B. Sahin, I. Teke, C. Gungor, S. Atas "Comparative Energetic And Exergetic Performance Analyses For Coal-Fired Thermal Power Plants In Turkey", No 48 2179–2186 2009

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. F. Karataş, B. Çetin “Çan Termik Santrali Eksergoekonomik Analizi”, Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi 242-246. 2021