

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ORHANELİ TERMİK SANTRALİNİN EKSERGOEKONOMİK VE
EKSERGOÇEVRESEL ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdullah DÜZCAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

TEMMUZ 2019

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ORHANELİ TERMİK SANTRALİNİN EKSERGOEKONOMİK VE
EKSERGOÇEVRESEL ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Abdullah DÜZCAN
(172080103)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yusuf Ali KARA

TEMMUZ 2019

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 172080103 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Abdullah DÜZCAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ORHANELİ TERMİK SANTRALİNİN EKSERGOEKONOMİK VE EKSERGOÇEVRESEL ANALİZİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Yusuf Ali KARA**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Mehmet Ziya SÖĞÜT**
Piri Reis Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Tayfun TANBAY
Bursa Teknik Üniversitesi

Savunma Tarihi :

FBE Müdürü : **Doç. Dr. Murat ERTAŞ**
Bursa Teknik Üniversitesi/...../.....

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Abdullah DÜZCAN

İmzası :

X X X X



Aileme,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmamda beni yönlendiren, her yönden destekleyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Yusuf Ali KARA'ya, 15. Ekserji ve Uygulamaları yaz kursu programını düzenleyen düzenleme komitesine, Orhaneli Termik Santrali yetkilileri Umut AKTAŞ Bey'e ve Mehmet KORKMAZ Bey'e ve her zaman beni olumlu yönde motive eden aileme teşekkür ederim.

Temmuz 2019

Abdullah DÜZCAN



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	vii
SEMBOLLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Literatür Taraması	4
2. MATERYAL METOT	6
2.1 Enerji	6
2.1.1 Termodinamik yasaları	6
2.1.2 Enerji analizi	7
2.1.3 Sistemde yapılan kabuller	8
2.1.4 Yanma tepkimesi.....	10
2.2 Ekserji.....	11
2.2.1 Kinetik ve potansiyel ekserji.....	12
2.2.2 Fiziksel ekserji	12
2.2.3 Kimyasal ekserji.....	13
2.3 Eksergoekonomik Analiz	17
2.3.1 Ekonomik analiz	17
2.3.2 Sistemin eksergoekonomik analizi.....	18
2.4 Eksergoçevresel Analiz	24
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	30
3.1 Enerji Analizi	30
3.2 Ekserji Analizi.....	31
3.3 Eksergoekonomik Analizi	36
3.4 Eksergoçevresel Analizi	39
4. SONUÇLAR	43
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ.....	49

KISALTMALAR

B	: Boiler (Kazan)
C	: Condenser (Kondenser)
CO	: Construction (İnşa etme)
CRF	: İlk Yatırım İyileştirme Oranı
D	: Dearatör
DI	: Disassembly (Parçalarına Ayırma)
ECT	: Exergetic Cost Theory (Ekserjetik Maliyet Teorisi)
EDIP	: Environmental Development of Industrial Products (Endüstriyel Ürünlerin Çevresel Gelişimi)
EEA	: Exergy Economic Approach (Ekserji Ekonomik Yaklaşım)
EES	: Engineering Equation Solver
EF	: Environmental Footprint (Çevresel Ayak İzi)
EFA	: Engineering Functional Analysis (Mühendislik Fonksiyonel Analizi)
EPDK	: Enerji Piyasası Denetleme Kurumu
EPS	: Environmental Priority Strategies (Çevresel Öncelikli Stratejiler)
ER	: Dolar TL Kur Fiyatı
EXCEM	: Exergy Cost Energy Mass Analysis (Ekserji Maliyet Enerji Kütle Analizi)
F	: Fuel (Yakıt)
FBCC	: Fluidized Bed Coal Combustor (Akışkan Yataklı Kömür Yakıcısı)
FEA	: First Exergoeconomic Approach (İlk Eksergoekonomik Yaklaşım)
FW	: Paranın Gelecekteki Değeri
G	: Generatör (Jeneratör)
HHV	: Higher Heating Value (Üst Isıl Değer)
HPH	: High Pressure Heater (Yüksek Basınç Isıtıcısı)
HPT	: High Pressure Turbine (Yüksek Basınç Türbini)
HRSG	: Heat Recovery Steam Generator
IPT	: Intermediate Pressure Turbine (Orta Basınç Türbini)
ISO	: International Standards Organization (Uluslararası Standartlar Organizasyonu)
LCA	: Life Cycle Assessment (Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi)
LPH	: Low Pressure Heater (Alçak Basınç Isıtıcısı)
LPT	: Low Pressure Turbine (Alçak Basınç Türbini)
MOPSA	: Modified Productive Structure Analysis (Modifiye Edilmiş Ürün Yapısı Analizi)
MTEP	: Milyon Ton Eşdeğer Petrol
NCV	: Net Calorific Value (Alt Isıl Değer)
OM	: Operation and Maintenance (İşletme ve Bakım)
P	: Product (Ürün), Pompa
PEC	: Purchased Equipment Cost (Satın Alma Maliyeti)
PW	: Paranın Şimdi Değeri
PWF	: Paranın Şimdiki Zaman Faktörü

SAA	: Structural Analysis Approach (Yapısal Analiz Yaklaşımı)
SPECO	: Specific Exergy Costing (Özgül Ekserji Maliyeti Metodu)
SV	: Salvage Value (Hurda Değeri)
TCI	: Total Capital Investment (Toplam Kapital Yatırım)
TCMB	: Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası
TFA	: Thermoeconomic Functional Analysis (Termoekonomik Fonksiyonel Analiz)
TL	: Türk Lirası
ÜİD	: Üst Isıl Değer
YDD	: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
\$: Amerikan Doları



SEMBOLLER

AC	: Yıllık Yatırım Maliyeti Ödemeleri
a	: Sabit
b	: Birim Ekserji Çevresel Etkileri
B	: Ekserji Akım Çevresel Etkileri
c	: Birim Ekserji Akım Maliyetleri
C	: Ekserji Akım Maliyetleri
É	: Enerji
Éx	: Ekserji
f	: Eksergoekonomik ve Eksergoçevresel Faktör
g	: Yerçekimi İvmesi
GJ	: Giga Joule
h	: Entalpi
h_f	: Oluşum Entalpisi
i	: Bileşik Faiz Oranı
i_{eff}	: Efektif Faiz Oranı
kg	: Kilogram
m	: Kütleli Debi
mPts	: millipoints
MW	: MegaWatt
M_y	: Yakıtın Mol Sayısı
n	: Mol
°C	: Santigrat Derece
P	: Basınç
Pr	: Satış Fiyatı
Q_g	: Giren Enerji
r	: Bağıl Maliyet ve Çevresel Etki Farkı
R	: Universal Gaz Sabiti
s	: Entropi
T	: Temperature (Sıcaklık)
TTD	: Sıcaklık Farkı
TWh	: TeraWatt Hour (Tera Watt Saat)
v	: Hız
w	: Nem Miktarı
W_{net}	: Net İş
Y	: Bileşenlerin Çevresel Etkisi
z	: Zeminden Yükseklik
Z	: Ekipman Maliyeti
μ	: Hurda Değeri Katsayısı
η	: Verim

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Bursa Orhaneli kömür elementer analiz sonuçları.	10
Çizelge 2.2 : Sistemin bütün ekipmanları için enerji denklemleri.....	12
Çizelge 2.3 : Çeşitli bileşiklerin 1 atm ve 25 °C’ deki Standart molar kimyasal ekserji leri (kJ/kmol) [10].	13
Çizelge 2.4 : F P kuralına göre ekserji denklemleri.....	14
Çizelge 2.5 : Her ekipman için satın alma maliyetleri (PEC).....	21
Çizelge 2.6 : Eksergoekonomik denge ve yardımcı denklemleri.	23
Çizelge 2.7 : Ekipmanların hammadde oranları [39, 40] ve eko-indikatör 99 puanları [41].	26
Çizelge 2.8 : Ekipmanların ağırlık hesaplama formülleri [23]	26
Çizelge 2.9 : Eksergoçevresel denge denklemleri.	28
Çizelge 3.1 : Sistemin termodinamik değerleri.	32
Çizelge 3.2 : Sistemdeki her ekipmanın ekserji verimi ve ekserji yıkımı.	34
Çizelge 3.3 : Literatür ile karşılaştırmalı olarak ekserji verimleri.	35
Çizelge 3.4 : Sistem komponentelerinin eksergoekonomik analizi sonuçları.	36
Çizelge 3.5 : Orhaneli Termik Santraline ait ekserji, ekserji maliyet akımı ve birim ekserji maliyetleri.....	38
Çizelge 3.6 : Sistem komponentelerinin eksergoçevresel analizi sonuçları.	40
Çizelge 3.7 : Orhaneli Termik Santraline ait ekserji, ekserji çevresel akımı ve birim çevresel maliyetleri.	41

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Orhaneli Termik Santrali sistem şeması [9]	9
Şekil 2.2a : Ürün ve yakıt kuralına göre ekserji denge denklemleri [10].	15
Şekil 2.2b : Ürün ve yakıt kuralına göre ekserji denge denklemleri [10].	16
Şekil 2.3a : Ürün ve yakıt kuralına göre eksergoekonomik denge denklemleri [10]	19
Şekil 2.3b : Ürün ve yakıt kuralına göre eksergoekonomik denge denklemleri [10]	20
Şekil 2.4 : Yaşam döngüsü aşamaları [37].	25
Şekil 3.1 : Karşılaştırmalı fiziksel ekserjiye dayalı ekserji verimleri	33
Şekil 3.2 : Sistemdeki ekipmanların ekserji verimleri	34

ORHANELİ TERMİK SANTRALİNİN EKSERGOEKONOMİK VE EKSERGOÇEVRESEL ANALİZİ

ÖZET

Bir sistemi değerlendirirken enerjetik olarak değerlendirmek yeterli değildir. Sistemde oluşan kayıpların yerini, miktarını belirlemek için ekserji analizi yapılmaktadır. Bu çalışmada Bursa Orhaneli Termik Santrali'nin enerji, ekserji, eksergoekonomik ve eksergoçevresel analizi yapılmıştır. Ekserji analizinde fiziksel ve kimyasal ekserji dikkate alınmış, potansiyel ve kinetik ekserjiler ihmal edilmiştir. Ekserji analizi ile sistem bileşenlerinin ekserji verimleri ve ekserji yıkımları hesaplanmıştır. En yüksek ve en düşük ekserji verimlerine sahip ekipmanlar %92,41 ile orta basınç türbini ve %8,89 ile kondenserdir. Ekserji analizi sonucuna göre, iyileştirme potansiyeli en yüksek eleman kondenser olarak belirlenmiştir. Eksergoekonomik analizde de SPECO metodu kullanılmış ve her ekserji akımına karşılık gelen maliyet değerleri hesaplanmıştır. Eksergoekonomik analiz sonucuna göre, yüksek basınç türbinine gönderilen buharın birim ekserji maliyeti ve ekserji maliyeti sırasıyla 22,19 \$/GJ ve 28.264 \$/h olarak hesaplanmıştır. Sistemde kullanılan her ekipmanın yaşam döngüsü analizi (LCA) yapılmıştır. Yaşam döngüsü analizinden alınan sonuçlar ekserji akımlarına aktararak eksergoçevresel analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucuna göre, çevreye en zararlı ekipman kondenser olarak tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Enerji, Ekserji, Eksergoekonomik Analiz, Eksergoçevresel Analiz

EXERGoeconomic AND EXERGoeNvIRONMENTAL ANALYSIS OF ORHANELI POWER PLANT

SUMMARY

When evaluating a system, it is not enough to evaluate it energetically. Exergy analysis is performed to determine the location and amount of losses in the system. In this study, energy, exergy, exergoeconomic and exergoenvironmental analysis of Bursa Orhaneli Thermal Power Plant were carried out. In exergy analysis, physical and chemical exergy were taken into consideration and potential and kinetic exergy were neglected. Exergy efficiency and exergy destructions of system components were calculated by exergy analysis. Equipments with the highest and lowest exergy yields are medium pressure turbines with 92.41% and condensers with 8.89%. According to the results of exergy analysis, the element with the highest improvement potential was determined as condenser. SPECO method was used in exergoeconomic analysis and cost values corresponding to each exergy flow were calculated. According to exergoeconomic analysis, unit exergy cost and exergy cost of steam sent to high pressure turbine were calculated as \$ 22.19/GJ and \$ 28,264/h, respectively. Life cycle analysis (LCA) of each equipment used in the system was performed. The results of the life cycle analysis were transferred to exergy flows and exergoenvironmental analysis was performed. According to the results of the analysis, the most harmful equipment to the environment was identified as a condenser.

Keywords: Energy, Exergy, Exergoeconomic Analysis, Exergoenvironmental Analysis

1. GİRİŞ

Dünyada ve Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde enerji ihtiyacı sürekli artmaktadır. Bunun nedeni, sanayi ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte ekonomik düzeyin artması ve nüfus artışıdır. Bu artan enerji ihtiyacını karşılamak için kurulan enerji dönüşüm sistemlerinin daha verimli kullanılması günden güne önem kazanmaktadır ve kazanmaya da devam edecektir.

Fosil yakıt rezervlerinin kısıtlı olmasından dolayı, tükenmesini önlemek veya tükenmesini geciktirmek için enerji dönüşüm sistemlerini daha verimli kullanmak ülkelerin hedefi haline gelmektedir [1]. Ülkemizde yer altı rezervi olarak ısıl değeri düşük linyit kömür bol miktarda bulunmaktadır. Bu kaynağı değerlendirmek amacıyla ülkemizde kömür santralleri kurulmuş ve bu sayede enerji üretmek için gerekli olan fosil yakıt ithalatı azaltılarak ülke ekonomisine önemli bir katkı sağlanmıştır.

Uluslararası Enerji Ajansı'nın 2018 yılında yayınlanan Dünya Enerji Dengesi: Genel Bakış raporuna göre, 2016 yıl sonunda dünyanın yıllık toplam enerji tüketimi 13.761 milyon ton eşdeğer petroldür (MTEP). Bu enerjinin %32'si petrol, %27'si kömür, %22'si doğal gaz, %10'u biyogaz ve atık ısı, %5'i nükleer, %2'si hidroelektrik ve %2'si ise geriye kalan yenilenebilir enerji kaynaklarından (rüzgar, jeotermal, güneş) elde edilmektedir [2].

Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın verilerine göre 2018 yıl sonu itibarıyla Türkiye'nin kurulu gücü 88.551 MW seviyesine ulaşmıştır. Bu kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı; %31,9 hidroelektrik, %25,6 doğal gaz, %21,5 kömür, %7,9 rüzgar, %5,7 güneş, %1,4 jeotermal ve %5,9 ise diğer kaynaklar şeklindedir [3].

Türkiye'deki elektrik üretiminin birinci enerji kaynaklarına göre dağılımı ise; %37,3 kömür, %29,8 doğal gaz, %19,8 hidrolik enerji, %6,6 rüzgar, %2,6 güneş, %2,5 jeotermal enerji ve %1,4 ise diğer kaynaklardır. Türkiye'deki 2018 yılında elektrik enerjisi tüketimi ise 303,3 TWh olarak ölçülmüştür [3]. Kurulu güç olarak kömür

üçüncü sırada olmasına rağmen, elektrik üretiminde kömür kullanımı ilk sırada yer almaktadır.

Yukarıda belirtilen veriler göz önüne alındığında hem Dünya’da hem de Türkiye’de enerji sektöründe fosil kaynaklı yakıtlar olan kömür, petrol ve doğal gaz kullanımı en yüksek orana sahiptir. Fosil yakıtların yanmasından dolayı oluşan emisyonlar hem çevreye hem de insanlığa zarar vermektedir. Oluşan bu emisyonlar atmosfere salınmaktadır. Bu emisyonlar atmosferde sera etkisine sebep olarak küresel ısınma ile iklim değişikliklerine neden olmaktadır [4].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının arz güvenliğinin olmamasından dolayı (güneşin gece olmaması, rüzgarın şiddetinin az veya fazla olması vb.), enerji ihtiyacı için fosil yakıtlar tercih edilmektedir. Fosil yakıtları en verimli, en ekonomik ve en çevre dostu olacak şekilde kullanmak gerekmektedir. Bunun için, kullanılan sistemler optimize edilerek daha az maliyetli ve daha az emisyon yayan sistemler haline getirilmeye çalışılmaktadır. Bu sayede enerjiyi daha verimli kullanıp tasarruf edilecek ve ülkemizin enerji ithalatını önemli ölçüde azaltacaktır.

Enerji üreten bir termik santralin performansını değerlendirirken, termodinamiğin birinci kanunu uygulanarak (enerjinin korunumu) enerji analizi yapılmaktadır. Enerji analizi sayesinde sistemdeki ekipmanların verimli çalışıp çalışmadığı belirlenmektedir. Ardından termodinamiğin ikinci kanunu uygulanarak ekserji analizi (kullanılabilirlik) yapılmaktadır. Ekserji bir sistemin termodinamiksel olarak sahip olduğu enerjinin çevre şartlarına göre kullanılabilirliğini gösteren bir parametredir [5]. Ekserji analizi sistemdeki entropi üretiminden kaynaklanan tersinmezliklerden dolayı olan kayıpları göz önüne almaktadır. Ekserji analizi ile sistemdeki ekserji yıkımlarının yeri ve miktarı doğru bir şekilde tespit edilmektedir. Bu tespit sayesinde var olan enerji dönüşüm sistemlerinin performansını iyileştirmede veya yeni kurulacak olan sistemleri daha performanslı hale getirmek için kullanışlı bir yöntemdir. Ekserji analizi aynı zamanda var olan enerji kaynağını daha verimli kullanmayı sağlayan bir yöntemdir [6]. Ayrıca, enerji tüketimi, bir ülkenin ekonomik ve sosyal gelişmişliğini gösteren en önemli parametrelerden biridir. Dincer ve Rosen [7]’e göre, ekserji analizi; enerjiyi, çevreyi ve sürdürülebilir gelişmeyi birbirleriyle ilişkilendiren bir yöntemdir. Anlık olarak performansta iyileşme, yüksek verim istenmemektedir. Yüksek verim ve iyi performansın sürekli olmasını sağlamak için sürdürülebilir gelişme ve kalkınma önem arz etmektedir.

Enerji tüketiminde kullanılan yakıtın ve üretilen elektriğin birim fiyatı önemlidir. Bunu belirleyen en önemli parametreler ise sistemin kurulum (satın alma, işletme ve bakım) maliyetleri ile yakıt maliyetidir. Burada eksergoekonomik analiz devreye girer. Eksergoekonomik analiz, ekserji analizi ile ekonomik analizi birleştiren bir yöntemdir. Eksergoekonomik analiz, termodinamiksel verimsizliklerin, ekserji yıkımlarının ve ekserji transferlerinin parasal karşılığını ifade eden bir yaklaşımdır. Sistemde kullanılan bir ekipmanın girişindeki ve çıkışındaki ekserji maliyetleri bilindiğinde bu ekipmanın değiştirilmesinin faydalı olup olmadığının belirlenmesine yarar. Yani, sistemde kullanılan bir ekipmanı daha iyi verimle çalışan bir ekipmanla değiştirmemizin maliyetini belirlememize yarar. Ancak, çok yüksek verimle çalışan bir ekipmanla değiştirmemiz her zaman iyi olmayabilir. Çünkü, yüksek verimli cihazların satın alma, işletme ve bakım maliyetleri yüksek olduğundan, bu yüksek maliyet verimden elde edilecek kazancı telafi etmeyebilir.

Ekserji ve eksergoekonomik analizde, sistemin ekserjetik ve ekonomik açıdan değerlendirmesi yapılmaktadır. Ancak bir sistemi değerlendirmek için bu iki parametre yeterli değildir. Eksergoçevresel analiz ile sistem ekipmanlarının ekserjetik olarak çevreye etkileri incelenmektedir. Eksergoçevresel analiz, sistemdeki bileşenlerin hammadde olarak başlayıp ürün haline gelmesi süresi boyunca (beşikten mezara), çevreye verdikleri zararı yaşam döngüsü analizi (LCA) ile birlikte değerlendirmektedir [8].

Bir sistemi değerlendirmek için sadece enerji, sadece ekserji, sadece ekonomik veya sadece çevresel açıdan değerlendirmek yanlış olur. Dolayısıyla sadece birisiyle değil, tamamıyla karar mekanizmasını çalıştırmak hem maliyet hem de çevreye, yani içinde yaşadığımız dünyamıza faydalı olacaktır.

1.1 Tezin Amacı

Türkiye, enerji açısından dışa bağımlı bir ülke olduğundan dolayı, bu bağımlılığı azaltmak amacıyla ülkemizde bulunan linyit kömür santrallerinin daha verimli hale getirilmesi önem arz etmektedir. Erdem vd. [9] tarafından yapılan çalışmada Türkiye’de kurulu olan ve linyit kömürü kullanan 11 adet termik santralin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Yaptıkları çalışmada, ekserji analizinde sadece fiziksel ekserji dikkate alınmış, kimyasal ekserji dikkate alınmamıştır. Bu tez çalışmasında enerji ve ekserji analizinin detaylı olarak anlatılmasının nedeni, Erdem vd. [9]

tarafından yapılan çalışmada bütün noktalar için kütleli debi, basınç ve sıcaklık bilgisi belirtilmediğinden sistem tekrar tasarlanmıştır. Kimyasal ekserjiyi de dikkate alarak sistemi ekonomik olarak değerlendirip her ekserji akım noktasının maliyeti bulunacaktır. Asıl elde etmek istediğimiz ürün olan elektriğin maliyet artışına sebep olan ekipman belirlenecektir. Ardından, her bir ekipmanın yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılarak her bir ekipmanın çevreye verdiği zarar tespit edilecektir. Bu çevresel zararlar her bir ekserji akımı ile ilişkilendirilerek eksergoçevresel analiz yapılacaktır. Bu analiz ile, eksergoekonomik analizdeki gibi, son ürün olan elektriği elde etmek için hangi ekipmanın çevreye daha çok zarar verdiği tespit edilecektir.

1.2 Literatür Taraması

Bejan vd. [10] kitabında, termodinamik kanunlarını ele alıp, entropi üretimi ve ikinci yasa analizi ile ekserji analizini detaylı olarak irdelemektedir. Ardından, enerji dönüşüm sistemlerinin performansını değerlendirmek için ekserji analizi ile ekonomik analizi birleştirerek eksergoekonomik analizini anlatmıştır. Enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizini bir kojenerasyon sistemine uygulamış ve sonuçlarını değerlendirmiştir. Ürünlerin ekserjiye dayalı maliyetini minimuma indireyecek eksergoekonomik optimizasyon yöntemini detaylı olarak anlatmıştır.

Topal vd. [11] çalışmasında, akışkan yataklı ve zeytin çekirdekli yakıcı kullanan termik santralin ekserji analizi yapılmıştır. Santraldeki toplam ekserji yıkımı 295 MW olarak hesaplanmış ve bunun büyük bölümü 252,4 MW ile ana kazanda gerçekleşmiştir. Kazandaki ekserji yıkımı toplam ekserji yıkımının %86,05'i olarak hesaplanmıştır.

Ozdemir vd. [12] tarafından yapılan çalışmada, akışkan yataklı kömür yakıcılı (FBCC) termik santralin eksergoekonomik analizi yapılmıştır. Sistemin alt bileşenleri olarak ısı geri kazanımlı buhar kazanı (HRSG), pompa, siklon, ekonomizer, aspirasyon fanı ve baca dikkate alınmıştır. Ekserji analizi sonucuna göre, tüm sistemin ekserji verimi %20,28 olarak hesaplanmıştır. Tersinmezliklerden dolayı, en yüksek ekserji yıkımı %89,2 ile FBCC de gerçekleşmiştir. FBCC'yi sırasıyla HRSG, ekonomizer, aspirasyon fanı, baca ve pompa takip etmektedir. Bu termik santralde üretilen buharın birim ekserji maliyeti ile buharın ekserji maliyeti sırasıyla 17,88 \$/GJ ve 93,57 \$/h olarak hesaplanmıştır.

Uysal vd. [13] yaptıkları çalışmada, Türkiye’de kurulu olan 160 MW kapasiteli bir kömür santralinin ekserji ve termoekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Termik santraldeki bütün ekipmanları adyabatik olarak kabul ederek sistem tasarlanmış ve sistemin ekserjetik verimi %39,89 olarak hesaplanmıştır. Termoekonomik analizi iki farklı metot (SPECO ve MOPSA) ile gerçekleştirmiş ve santralde üretilen elektriğin birim ekserji maliyetini sırasıyla 12,14 \$/GJ ve 14,06 \$/GJ olarak tespit edilmiştir.

Ameri vd. [14] çalışmalarında gaz yakıtlı termik santralin enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. En büyük enerji kaybı 306,9 MW ile kondenserde iken, kazanda sadece 67,63 MW olarak ölçülmüştür. En büyük ekserji kaybı %81 ile kazanda gerçekleşirken ve toplam ekserji kaybının sadece %5’i kondenserde gerçekleşmektedir. Ekserji yıkımının maliyetinin en büyük olduğu ekipman ise kazandır.

Xiong vd. [15] yaptıkları çalışmada, Çin’deki 300 MW kapasiteli bir kömür yakıtlı bir santrali termoekonomik açıdan optimizasyonunu yapmışlardır. Buradaki amaç, termik santralin toplam yıllık maliyetini minimuma indirmektir. Bu çalışma sayesinde toplam yıllık maliyette %2,5 iyileştirme ve yatırım maliyetinde ise %3,5 iyileştirme sağlanmıştır.

Restrepo vd. [16] çalışmalarında, pülverize kömür santralini ekserjetik ve çevresel olarak incelemişlerdir. SimaPro 7.2 programı ile yaşam döngüsü analizi yaparak, iklim değişikliği ve asitleşme etki değerlerini dikkate almışlardır. Çevreye en çok etkinin 1300 kg/ MWh ile yanma prosesi sonucu kazanda olduğu tespit edilmiştir.

Restrepo ve Bazzo [17] yaptıkları çalışmada, pirinç samanı ve kömür kullanılan 50 MW güç kapasiteli termik santralin eksergoçevresel analizini yapmışlardır. Termik santralde sadece iki farklı senaryo denemişlerdir; yakıt olarak sadece kömür kullanmak ve enerjetik olarak %10 pirinç samanı karışımı kömür kullanmak. İki durumun eksergoçevresel analizi sonuçlarını sırasıyla 16,43 kg CO₂-eşdeğer/s ve 12,3 CO₂-eşdeğer/s olarak hesaplamışlardır.

Ahmedi ve Dinçer [18] yaptıkları çalışmada, gaz türbinli bir termik santralin termodinamik, eksergoçevresel analizini yaparak sistemin çok amaçlı optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonucunda, sistemdeki optimum çalışma koşulları tespit edilerek, sistemin ekserji verimini %33,56 artırmış ve çevresel etkileri ise %50,50 azaltmışlardır.

2. MATERYAL METOT

Bu bölümde Orhaneli Termik Santrali'nin enerji, ekserji, eksergoekonomik ve eksergoçevresel analizleri yapılacaktır.

2.1 Enerji

Enerji, bir sistemin iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Enerji aynı zamanda değişikliğe sebep olma kabiliyeti olarak da tanımlanabilmektedir [5]. Enerji; mekanik, kimyasal, nükleer, kinetik, potansiyel, termal, hareket, ses ve elektrik gibi farklı biçimler almaktadır. Bir sistemin toplam enerjisi bu enerjilerin toplamına eşittir. Enerji elde yöntemleri olarak ise yenilenebilir ve yenilenemeyen enerji olarak ikiye ayrılmaktadır. Biyokütle, hidro, jeotermal, rüzgar ve güneş yenilenebilir enerji; petrol, doğalgaz, kömür ve nükleer ise yenilenemez enerji olarak sınıflandırılmaktadır.

2.1.1 Termodinamik yasaları

Termodinamik dört kanundan oluşmaktadır. Sıfırıncı kanuna göre, eğer iki termodinamik sistem bir üçüncü sistem ile termodinamik dengedelerse, ilk iki sistem de birbirleriyle termodinamik dengededirler.

Termodinamiğin birinci kanununa göre, “kapalı bir sistemin belirli iki hali arasında gerçekleşebilecek tüm adyabatik hal değişimleri sırasında yapılan net iş, sisteme veya hal değişimlerine bağlı olmaksızın aynıdır” [5]. Birinci kanun enerjinin korunum kanunudur. Birinci kanuna göre enerji ne yok edilebilir ne de yoktan var edilebilir. Enerji sadece bir formdan başka bir forma dönüştürülebilir.

Entropi bir sistemin düzensizliğinin, rastlantısallığının nicel olarak ölçümüdür. İzotermal bir sistemin entropi değişimi Denklem 2.1’de gösterilmiştir.

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad (2.1)$$

Birinci kanun, enerjinin korunum kanunudur ve hal değişiminin yönünü belirlemez. İkinci kanun ise prosesin yönünü belirler. Hal değişimi ve reaksiyon yönü entropinin arttığı yöne doğrudur. Yani, ikinci kanuna göre ayrık (kapalı, adyabatik) bir sistemin

entropisi her zaman artar. Örneğin, kapalı ve adyabatik bir sistem olan evrenin entropisi sürekli artmaktadır.

Termodinamiğin ikinci kanununun Kelvin-Planck ifadesine göre hiçbir ısı makinesi %100 verimle çalışmaz. Çevreye ısı atmak zorunda olduğundan dolayı aldığı enerjinin tamamını işe çeviremez. Bundan dolayı verimlilik Denklem 2.2’de tanımlanmaktadır.

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_g} \quad (2.2)$$

Clasius ifadesine göre bir termodinamik döngü içinde çalışan bir sistem dışarıdan iş almadığı sürece düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklığa doğru ısı akışı üretmez.

Termodinamiğin üçüncü kanununa göre ise saf bir kristalin mutlak 0 K’de entropisi sıfırdır.

2.1.2 Enerji analizi

Enerji analizi, termodinamiğin sıfırncı ve birinci kanununa dayanmaktadır. Sürekli durum sürekli akışlı açık sistemler için kontrol hacmine giren toplam kütle çıkan toplam kütleyle eşittir.

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (2.3)$$

Sürekli akışlı sürekli açık sistemler için enerji dengesinin en genel hali Denklem 2.4 ile, açık hali Denklem 2.5 ile gösterilmiştir.

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_ç \quad (2.4)$$

$$\dot{Q}_g + \dot{W}_g + \sum_g \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_ç + \dot{W}_ç + \sum_ç \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (2.5)$$

Bu çalışmada Bursa Orhaneli Termik Santrali’nin enerji, ekserji, eksergoekonomik ve eksergoçevresel analizleri yapılmıştır. Sistemin proses şeması Şekil 2.1’de gösterilmektedir. Sistemde yüksek, orta ve alçak basınç olmak üzere toplam 3 adet buhar türbini, 4 adet alçak basınç ısıtıcıları ve 3 adet yüksek basınç ısıtıcıları vardır. 3 adet pompa seti, dearatör, kazan ve kondenserden oluşan santral 210 MW güç üretecek şekilde tasarlanmıştır.

Orhaneli kömür sahasından alınan kömür kurutma işlemine tabi tutulduktan sonra kazana (B) gönderilir. Dışarıdan alınan yakma havası ile birlikte yanan kömür yüksek sıcaklıkta baca gazı üretir. Yüksek sıcaklıktaki baca gazının ısısı kazana gelen besleme suyuna aktarılarak yüksek basınç türbinine (HPT) gönderilir. Yüksek sıcaklıktaki

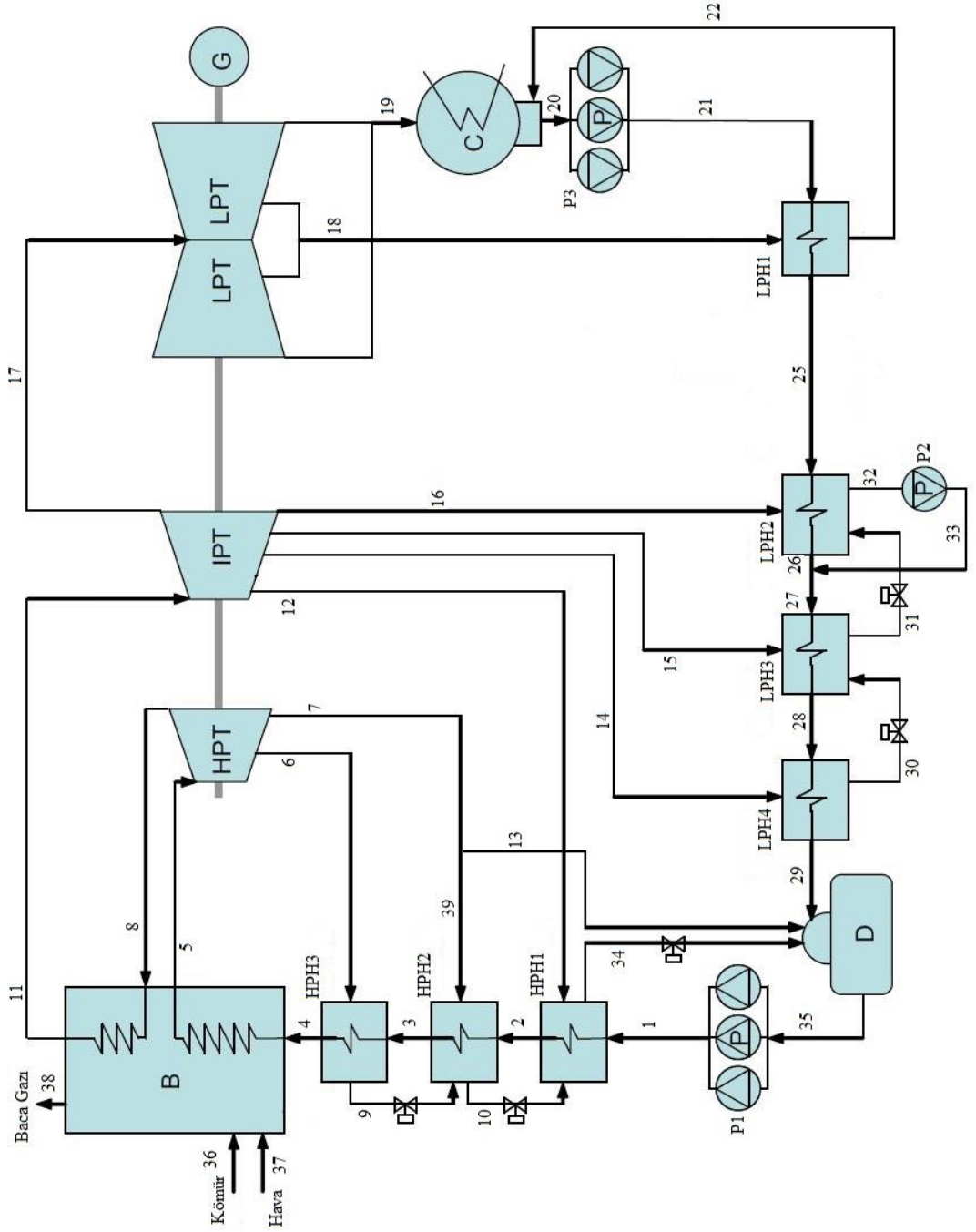
buharın enerjisinden faydalanılarak güç üretilirken sıcaklığı düşen kızgın buhar tekrar kazana gönderilerek tekrar kızdırma işlemi uygulanır. Sıcaklığı artan kızgın buhar orta basınç türbinine (IPT) gönderilerek burada da güç üretilir. Sıcaklığı ve basıncı daha düşen kızgın buhar alçak basınç türbinine (LPT) gönderilerek tekrar güç üretilir. İş üretme potansiyeli kalmayan çürük buhar kondensere (C) gönderilerek yoğuşturulur. Yoğuşan su pompa vasıtasıyla basınçlandırılarak ısı değiştiricisi görevi gören alçak basınç ısıtıcılarına (LPH1, LPH2, LPH3 ve LPH4) sırasıyla gönderilir. Alçak basınç türbininden çekilen ara buhar alçak basınç ısıtıcısında (LPH1) yoğuşurken, ana hattaki suyun sıcaklığı bir miktar artmaktadır. Buradaki yoğuşan su kondensere gönderilmektedir. Orta basınç türbininden çekilen ara buharlar alçak basınç ısıtıcılarına (LPH2, LPH3 ve LPH4) gönderilmekte ve kızgın buhar ısını suya aktararak yoğuşmuş olarak ısı değiştiricisinden çıkmaktadır. Yoğuşan suyun basıncı basınç düşürücüsü ile azaltılarak bir sonraki ısı değiştiricisine gönderilmektedir. Bu sayede, ana hattaki kazan besleme suyunun sıcaklığı artmaktadır. Yüksek basınç türbininden (HPT) gelen kızgın buhar, yüksek basınç ısıtıcıdan (HPH1) ve alçak basınç ısıtıcısından (LPH4) gelen su deaeratorde (D) toplanmaktadır. Deaeratorde çıkan su pompa vasıtasıyla basınçlandırılıp yüksek basınç ısıtıcısına (HPH1) gönderilir. Yüksek basınç türbininden (HPT) gelen kızgın buhar yüksek basınç ısıtıcılarından yoğuşarak çıkar. Yoğuşan su basınç düşürücü ile basıncı azaltılarak bir sonraki yüksek basınç ısıtıcısına gider. Pompadan çıkan su yüksek basınç ısıtıcılarından (HPH1, HPH2 ve HPH3) sırasıyla geçerek kazana gider. Aynı mil üzerinde bulunan yüksek, orta ve alçak basınç türbininden üretilen iş jeneratör (G) sayesinde elektriğe dönüştürülerek şebekeye aktarılır. Sistemde kullanılan üç pompa seti için gerekli olan enerji ihtiyacı jeneratörden üretilen elektrik ile karşılanır. Bu şekilde çevrim tamamlanmış olur.

2.1.3 Sistemde yapılan kabuller

Sistemin enerji analizini yapabilmek için gerekli olan kabuller aşağıda belirtilmiştir.

- Sistemin analizi için tasarım koşulları dikkate alınmıştır.
- Sistemdeki her bir ekipman ayrı kontrol hacmi olarak ele alınmıştır.
- Sistemdeki her bir ekipman kararlı durum koşulları altında çalışmaktadır.
- Yanma reaksiyonu tam olarak gerçekleşmiştir.
- Bütün gazlar (hava ve baca gazları) ideal gaz olarak kabul edilmiştir.

- Çevre şartları 25 °C and 1,01325 bar olarak kabul edilmiştir.
- Kinetik ve potansiyel enerjiler ve ekserjiler ihmal edilmiştir.
- Kontrol hacmi ile yakın çevre arasındaki sıcaklık farkı ihmal edilmiştir. (Adyabatik)
- Borulardaki ve ekipmanlardaki basınç kayıpları ihmal edilmiştir.



Şekil 2.1 : Orhaneli Termik Santrali sistem şeması [9].

2.1.4 Yanma tepkimesi

Orhaneli bölgesindeki kömür madenlerinden çıkarılan kömür sistemde kullanılmaktadır. Kullanılan kömürün kimyasal formülünü hesaplamak için kömürün elementer analiz sonuçları Çizelge 2.1’de gösterilmektedir [21]. Çizelge 2.1’de madenden çıkarılmış orijinal hali, havada kurutulmuş hali, tamamen kurutulmuş hali ve hem sudan hem de külden arındırılmış haliyle kömürün üst ve alt kalorifik değerleri ve elementer analiz sonuçları gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 : Bursa Orhaneli kömür elementer analiz sonuçları.

		Orijinal	Havada Kuru	Kuru	Kuru Kulsüz
Kalorifik Değer (kJ/kg)	Alt Isıl Değer	16085	20114	22677	25235
	Üst Isıl Değer	17447	21243	23655	26321
Elementer Analiz (%)	C(karbon)	47,46	57,79	64,35	71,61
	H(hidrojen)	3,29	4,01	4,46	4,97
	N(azot)	2	2,44	2,71	3,02
	O(oksijen)	11,97	14,56	16,24	18,05
	S(kükürt)	1,56	1,9	2,11	2,35
	Nem	26,25	10,2	-	-
	Kül	7,47	9,1	10,13	-

$$c = \frac{c' \left[\frac{kg_C}{kg_{yakıt}} \right]}{12,011} M_y \quad (2.6)$$

$$s = \frac{s' \left[\frac{kg_S}{kg_{yakıt}} \right]}{32,064} M_y \quad (2.7)$$

$$n = \frac{n' \left[\frac{kg_N}{kg_{yakıt}} \right]}{14,007} M_y \quad (2.8)$$

$$h = \frac{h' \left[\frac{kg_H}{kg_{yakıt}} \right]}{1,008} M_y \quad (2.9)$$

$$o = \frac{o' \left[\frac{kg_O}{kg_{yakıt}} \right]}{15,99} M_y \quad (2.10)$$

$$w = \frac{w' \left[\frac{kg_{H_2O}}{kg_{yakıt}} \right]}{18,015} M_y \quad (2.11)$$

Burada c' , s' , n' , h' o' ve w' elementin kütleli yüzdesini, c , s , n , h , o ve w ise elementin kömürdeki mol oranını vermektedir. Elementer analizi bilinen kömürün kapalı formülü Denklem 2.6 - Denklem 2.11'den hesaplanarak $C_cH_hO_oN_nS_s(H_2O)_w$ olarak belirlenecektir.

Üst ısı değeri bilinmeyen kömürlerin üst ısı değeri Denklem 2.12 ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{U}ID = HHV = \left(33,829c' + 111,28 \left(h' - \frac{o'}{8} \right) + 9,42s' \right) * 1000 \quad (2.12)$$

Üst ısı değeri Mendeleev denklemine göre ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [22].

$$Q = \frac{4.184[81C+300H-26(O-S)]}{10}, \left[\frac{kJ}{100g} \right] \quad (2.13)$$

Kimyasal olarak tepkimeye giren sürekli akışlı sürekli açık sistemler için enerji dengesi [1];

$$\dot{Q}_g + \dot{W}_g + \sum \dot{n}_f (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_r = \dot{Q}_ç + \dot{W}_ç + \sum \dot{n}_p (\bar{h}_p^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_p \quad (2.14)$$

$$h_c = h_r - h_p = HHV \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (2.15)$$

Kömürün üst ısı değerine bağlı olarak yanma reaksiyonundan elde edilecek enerji miktarı Denklem 2.14 ile hesaplanmaktadır [5].

Orhaneli Termik Santralindeki bütün ekipmanların enerji denklilikleri Denklem 2.5 uygulanarak Çizelge 2.2 de gösterilmektedir.

2.2 Ekserji

Ekserji, referans bir çevredeki belirli bir enerjinin faydalı iş yapma potansiyelidir. Ekserji, bir maddeyi çevresiyle termodinamik olarak dengeye getirirken elde edilen maksimum iş miktarıdır. Ekserji, kısaca kullanılabilirlik (availability) olarak da tanımlanmaktadır [5, 10, 23].

Termodinamiğin birinci kanununu uygulayarak enerji analizi yapmak sistemdeki kusurları, eksiklikleri ve bunların yerlerini belirlemez. Hem bunları belirlemek hem de sistemi nicel olarak analiz etmek için termodinamiğin ikinci kanunu ile ekserji analizi yapmak gerekmektedir. Ekserji analizinin bir diğer amacı ise sistemdeki olası termodinamik iyileştirmeleri tespit etmektir. Enerji her zaman korunurken, ekserji

tersinir proseslerde korunur ve tersinmez proseslerde ise daima yok olur. Enerji çevre şartlarına bağlı değilken, ekserji çevre şartlarına bağlıdır.

Çizelge 2.2 : Sistemin bütün ekipmanları için enerji denklemleri.

Ekipman	Enerji Denge Denklemleri	Denklemler Numarası
P1	$\dot{E}_{35} + \dot{W}_{P1} = \dot{E}_1$	2.16
P2	$\dot{E}_{32} + \dot{W}_{P2} = \dot{E}_{33}$	2.17
P3	$\dot{E}_{20} + \dot{W}_{P3} = \dot{E}_{21}$	2.18
HPT	$\dot{E}_5 = \dot{E}_6 + \dot{E}_7 + \dot{E}_8 + \dot{W}_{HPT}$	2.19
IPT	$\dot{E}_{11} = \dot{E}_{12} + \dot{E}_{14} + \dot{E}_{15} + \dot{E}_{16} + \dot{E}_{17} + \dot{W}_{IPT}$	2.20
LPT	$\dot{E}_{17} = \dot{E}_{18} + \dot{E}_{19} + \dot{W}_{LPT}$	2.21
D	$\dot{E}_{13} + \dot{E}_{29} + \dot{E}_{34} = \dot{E}_{35}$	2.22
C	$\dot{E}_{19} + \dot{E}_{22} = \dot{E}_{20}$	2.23
LPH1	$\dot{E}_{18} + \dot{E}_{21} = \dot{E}_{22} + \dot{E}_{25}$	2.24
LPH2	$\dot{E}_{16} + \dot{E}_{25} + \dot{E}_{31} = \dot{E}_{26}$	2.25
LPH3	$\dot{E}_{15} + \dot{E}_{27} + \dot{E}_{30} = \dot{E}_{28} + \dot{E}_{31}$	2.26
LPH4	$\dot{E}_{14} + \dot{E}_{28} = \dot{E}_{29} + \dot{E}_{30}$	2.27
HPH1	$\dot{E}_1 + \dot{E}_{10} + \dot{E}_{12} = \dot{E}_2 + \dot{E}_{34}$	2.28
HPH2	$\dot{E}_2 + \dot{E}_9 + \dot{E}_{39} = \dot{E}_3 + \dot{E}_{10}$	2.29
HPH3	$\dot{E}_3 + \dot{E}_6 = \dot{E}_4 + \dot{E}_9$	2.30
B	$\dot{E}_4 + \dot{E}_8 + \dot{E}_{36} + \dot{E}_{37} = \dot{E}_5 + \dot{E}_{11} + \dot{E}_{38}$	2.31

2.2.1 Kinetik ve potansiyel ekserji

Kinetik ve potansiyel ekserji sıcaklık, basınç ve çevre şartlarından bağımsız olarak gösterilmektedir.

$$\dot{E}x_i^p = g * z_i \quad (2.32)$$

$$\dot{E}x_i^k = \frac{1}{2} * V_i^2 \quad (2.33)$$

2.2.2 Fiziksel ekserji

Fiziksel ekserji, bir sistemin başlangıç durumundan (T, P) çevresiyle (T₀, P₀) ısı olarak dengeye getirilene kadar elde edebileceğimiz maksimum iş olarak tanımlanmaktadır.

$$\dot{E}x_i^f = \dot{m}[h_i - h_0 - T_0(s_i - s_0)] \quad (2.34)$$

2.2.3 Kimyasal ekserji

Çevresiyle kimyasal olarak dengede olmayan durumlarda ve yanma odası gibi kimyasal değişimin olduğu yerlerde ve faz değişiminin olduğu yerlerde dikkate alınır [7]. İdeal gazlar için standart molar kimyasal ekserjisi Denklem 2.35 ile hesaplanmaktadır [23].

$$E_i^k = n_j RT_0 \ln \frac{P_0}{P_j} \quad (2.35)$$

Bilinen bazı akışkanların kimyasal ekserjileri deneysel olarak hesaplanmış ve Model I ve Model II olmak üzere Çizelge 2.3 de gösterilmektedir.

Çizelge 2.3 : Çeşitli bileşiklerin 1 atm ve 25 °C’ deki Standart molar kimyasal ekserjileri (kJ/kmol) [10].

Madde	Formül	Model I	Model II
Azot	N ₂ (g)	639	720
Oksijen	O ₂ (g)	3951	3970
Karbondioksit	CO ₂ (g)	14176	19870
Su	H ₂ O(g)	8636	9500
Su	H ₂ O(b)	45	900
Karbon (Grafit)	C(s)	404589	410260
Hidrojen	H ₂ (g)	235,249	236100
Kükürt	S(s)	598158	609600
Karbonmonoksit	CO(g)	269412	275100
Kükürtdioksit	SO ₂ (g)	301939	313400
Azotmonoksit	NO	88851	88900
Azotdioksit	NO ₂ (g)	55565	55600
Hidrojenperoksit	H ₂ O ₂ (g)	133587	-
Hidrojen Sülfür	H ₂ S	799890	812000
Amonyum	NH ₃ (g)	336684	337900
Oksijen	O(g)	231968	233700
Hidrojen	H(g)	320822	331300
Azot	N(g)	453821	-
Metan	CH ₄ (g)	824348	831650
Asetilen	C ₂ H ₂ (g)	-	1265800
Etilen	C ₂ H ₄ (g)	-	1361100
Etan	C ₂ H ₆ (g)	1482033	1495840
Propilen	C ₃ H ₆ (g)	-	2003900
Propan	C ₃ H ₈ (g)	-	2154000
n-Bütan	C ₄ H ₁₀ (g)	-	2805800
n-Pentan	C ₅ H ₁₂ (g)	-	3463300
Benzen	C ₆ H ₆ (g)	-	3303600
Oktan	C ₈ H ₁₈ (g)	-	5413100
Metanol	CH ₃ OH(g)	715069	722300
Metanol	CH ₃ OH(b)	710747	718000
Etilalkol	C ₂ H ₅ OH(g)	1348328	1363900
Etilalkol	C ₂ H ₅ OH(b)	1342086	1375700

Sistemdeki bir noktanın toplam ekserjisi;

$$Ex_i = \dot{E}x_i^p + \dot{E}x_i^k + \dot{E}x_i^f + \dot{E}x_i^k \quad (2.36)$$

C, H, O, N ve S içeren ve (o/c) oksijen karbon oranı 0.667 den küçük olan katı yakıtlar için [23];

$$\varphi_{dry} = 1,0437 + 0,1882 \frac{h}{c} + 0,0610 \frac{o}{c} + 0,0404 \frac{n}{c} \quad (2.37)$$

Oksijen karbon oranı $0,667 < o/c < 2.67$ olan katı yakıtların için ise Denklem 2.38 ile gösterilmektedir [24];

$$\varphi_{dry} = \frac{1,0438 + 0,1882 \frac{h}{c} - 0,2509 \left(1 + 0,7256 \frac{h}{c}\right) + 0,0383 \frac{n}{c}}{1 - 0,3035 \frac{o}{c}} \quad (2.38)$$

Nem ve kül içermeyen katı yakıtın kimyasal ekserjisi Denklem 2.39 ile gösterilmektedir [23];

$$\varepsilon^o = [(NCV)^o + wh_{fg}] \varphi_{dry} + [\varepsilon_s^o - (NCV)_s^o] s \quad (2.39)$$

Çizelge 2.4 : F P kuralına göre ekserji denklemleri.

Ekipman	Denklem	Denklem	Denklem Numarası
HPH3	$P = \dot{E}_4 - \dot{E}_3$	$F = \dot{E}_6 - \dot{E}_9$	2.40
HPH2	$P = \dot{E}_3 - \dot{E}_2$	$F = \dot{E}_{39} + \dot{E}_9 - \dot{E}_{10}$	2.41
HPH1	$P = \dot{E}_2 - \dot{E}_1$	$F = \dot{E}_{12} + \dot{E}_{10} - \dot{E}_{34}$	2.42
P1	$P = \dot{E}_1 - \dot{E}_{35}$	$F = \dot{W}_{P1}$	2.43
D	$P = \dot{E}_{35}$	$F = \dot{E}_{34} + \dot{E}_{13} + \dot{E}_{29}$	2.44
LPH4	$P = \dot{E}_{29} - \dot{E}_{28}$	$F = \dot{E}_{14} - \dot{E}_{30}$	2.45
LPH3	$P = \dot{E}_{28} - \dot{E}_{27}$	$F = \dot{E}_{15} + \dot{E}_{30} - \dot{E}_{31}$	2.46
LPH2	$P = \dot{E}_{26} - \dot{E}_{25}$	$F = \dot{E}_{16} + \dot{E}_{31} - \dot{E}_{32}$	2.47
LPH1	$P = \dot{E}_{25} - \dot{E}_{21}$	$F = \dot{E}_{18} - \dot{E}_{22}$	2.48
P2	$P = \dot{E}_{33} - \dot{E}_{32}$	$F = \dot{W}_{P2}$	2.49
P3	$P = \dot{E}_{21} - \dot{E}_{20}$	$F = \dot{W}_{P3}$	2.50
C	$P = \dot{E}_{24} - \dot{E}_{23}$	$F = \dot{E}_{19} - \dot{E}_{20}$	2.51
B	$P = \dot{E}_5 + \dot{E}_{11} - \dot{E}_4 - \dot{E}_8$	$F = \dot{E}_{36} + \dot{E}_{37} - \dot{E}_{38}$	2.52
HPT	$P = \dot{W}_{HPT}$	$F = \dot{E}_5 - \dot{E}_6 - \dot{E}_7 - \dot{E}_8$	2.53
IPT	$P = \dot{W}_{IPT}$	$F = \dot{E}_{11} - \dot{E}_{12} - \dot{E}_{14} - \dot{E}_{15} - \dot{E}_{16} - \dot{E}_{17}$	2.54
LPT	$P = \dot{W}_{LPT}$	$F = \dot{E}_{17} - \dot{E}_{18} - \dot{E}_{19}$	2.55

Ekipman	Kompresör	Türbin	Isı Değiştirici
Şema			
Ürünün Ekserjisi	$\dot{E}_2 - \dot{E}_1$	\dot{W}	$\dot{E}_2 - \dot{E}_1$
Yakıtın Ekserjisi	\dot{W}	$\dot{E}_1 - \dot{E}_2 - \dot{E}_3$	$\dot{E}_3 - \dot{E}_4$

Şekil 2.2a : Ürün ve yakıt kuralına göre ekserji denge denklemleri [10].

Ekipman	Karışım	Yanma Odası	Kazan
Şema			
Ürünün Ekserjisi	\dot{E}_3	\dot{E}_3	$(\dot{E}_6 - \dot{E}_5) + (\dot{E}_8 - \dot{E}_7)$
Yakıtın Ekserjisi	$\dot{E}_1 + \dot{E}_2$	$\dot{E}_1 + \dot{E}_2$	$(\dot{E}_1 + \dot{E}_2) - (\dot{E}_3 + \dot{E}_4)$

Şekil 2.2b : Ürün ve yakıt kuralına göre ekserji denge denklemleri [10].

Ekserji verimini tanımlarken önce F (Fuel) ve P (Product) kuralını belirtmemiz gerekir. F ve P kuralı bir ekserji akımının yakıt mı yoksa bir ürün mü olduğunu belirtir. Bir sanayi tesisinde ürün, istenilen sonucu üretmeyi temsil ederken, yakıt ise ürünü üretirken harcanan hammaddedir. Örneğin, atmosfer sıcaklığının üzerinde çalışan bir ısı değiştiricide enerjisi dolayısıyla ekserjisi azalan hat yakıt (F) olarak kabul edilir. Enerjisi ve ekserjisi artan hat ise ürün (P) olarak kabul edilir. Bütün sistem elemanlarındaki ekserji akımlarının F ve P kuralına göre ayrılmış hali Çizelge 2.4’de gösterilmektedir.

Ekserji verimi ise elde edilen ürünün yakıtı oranı olarak Denklem 2.56’de gösterilmektedir [10].

$$\eta_{ex} = \frac{P}{F} \quad (2.56)$$

2.3 Eksergoekonomik Analiz

2.3.1 Ekonomik analiz

Şu an sahip olunan para zaman içerisinde faiz oranına bağlı olarak değer kaybeder. Bu değer kaybını önlemek için yatırım yapılsaydı, sahip olunan para faiz oranı kadar artış gösterecek ve değer kaybına uğramayacaktı. Paranın şimdiki değeri (PW) n yıl sonra nominal faiz oranına (i) göre değer kazanarak gelecekteki para değeri (FW) olarak Denklem 2.57 de gösterilmektedir [7,10].

$$FW = PW(1 + i)^n \quad (2.57)$$

Eğer faiz oranı yıllık değilse aylık veya yıl içerisinde p adet olacak olsaydı;

$$FW = PW\left(1 + \frac{i}{p}\right)^{np} \quad (2.58)$$

Bileşik faiz ise;

$$i_{eff} = \left(1 + \frac{i}{p}\right)^p - 1 \quad (2.59)$$

Bileşik faize göre hesaplanmış paranın gelecekteki değeri;

$$FW = PW(1 + i_{eff})^n \quad (2.60)$$

İlk yatırım iyileştirme faktörü (CRF) ise;

$$CRF = \frac{i_{eff}((1+i_{eff})^n)}{(1+i_{eff})^n - 1} = \frac{A}{P} \quad (2.61)$$

Bir paranın şimdiki zaman faktörü (PWF) ise;

$$PWF = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (2.62)$$

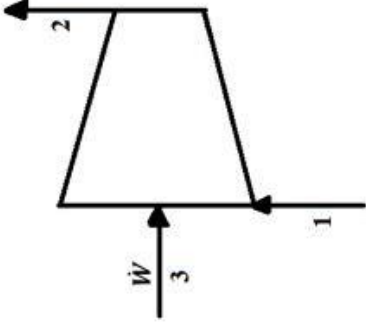
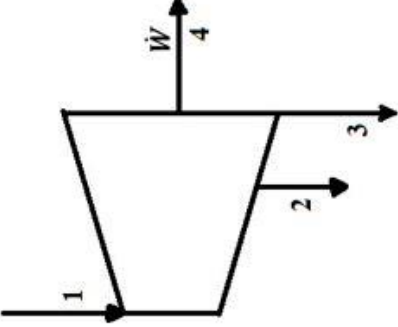
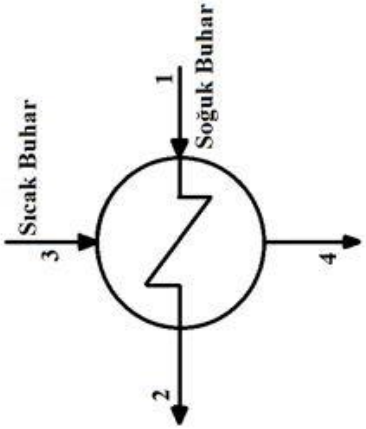
2.3.2 Sistemin eksergoekonomik analizi

Ekserji analizindeki amaç sistemdeki tersinmezliklerden kaynaklanan verimsizliklerin yerini ve büyüklüğünü tespit etmektedir. Genelde, sistemdeki termodinamik verimsizliklerin (ekserji kayıpları ve ekserji yıkımları) gerçek maliyeti bilinmemektedir [10]. Bu bilinmezliği ekonomik analizi de dahil ederek eksergoekonomik analiz ortadan kaldırmaktadır. Eksergoekonomik analiz sayesinde her bir ürünün maliyeti belirlenecektir. Bu analizdeki amaç son ürün maliyetini artıran ara ürünlerin kaynağını belirleyip, o kaynağı uygun maliyetli hale getirmektir. Kojenerasyon, trijenerasyon veya çoklu jenerasyon sistemlerinde birden fazla son ürün olduğu için, burada ekserji maliyetleri daha da önem kazanmaktadır.

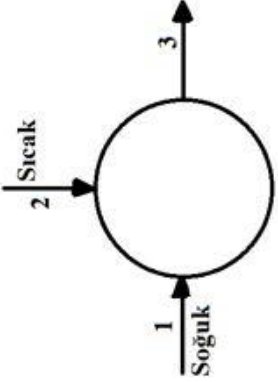
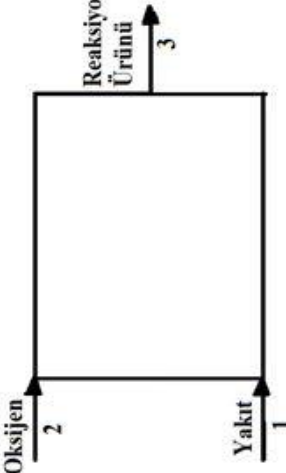
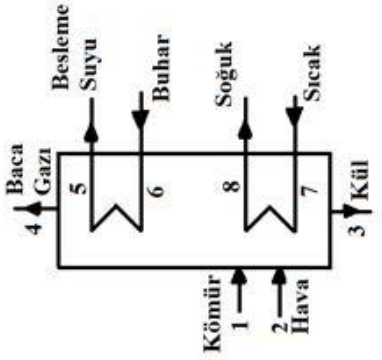
Literatürde yapılmış birçok eksergoekonomik analiz metotları bulunmaktadır. Bu modeller;

- EEA – Ekserji Ekonomik Yaklaşım (Exergy Economic Approach) [25]
- TFA – Termoekonomik Fonksiyonel Analiz (Thermoeconomic Functional Analysis) [26]
- FEA – İlk Eksergoekonomik Yaklaşım (First Exergoeconomic Approach) [27]
- EFA – Mühendislik Fonksiyonel Analizi (Engineering Functional Analysis) [28]
- SAA – Yapısal Analiz Yaklaşımı (Structural Analysis Approach) [29]
- EXCEM – Ekserji Maliyet Enerji Kütle Analizi (Exergy Cost Energy Mass Analysis) [6]
- MOPSA – Modifiye Edilmiş Ürün Yapısı Analizi (Modified Productive Structure Analysis) [30]
- SPECO – Özgül Ekserji Maliyeti Metodu (Specific Exergy Costing) [31, 32, 33]

Bu tez kapsamında literatürde bulunan birçok eksergoekonomik metotdan SPECO eksergoekonomik analiz yöntemi seçilmiştir. SPECO metodu üç aşamadan oluşmaktadır.

Ekipman	Kompresör	Türbin	Isı Değiştirici
Şema			
Ürünün Maliyeti	$\dot{C}_2 - \dot{C}_1$	\dot{C}_w	$\dot{C}_2 - \dot{C}_1$
Yakıtın Maliyeti	\dot{C}_w	$\dot{C}_1 - \dot{C}_2 - \dot{C}_3$	$\dot{C}_3 - \dot{C}_4$
Yardımcı Denklem	-	$c_2 = c_3 = c_1$	$c_4 = c_3$
Hesaplanan Değişken	c_2	c_w	c_2

Şekil 2.3a : Ürün ve yakıt kuralına göre eksergoekonomik denge denklemleri [10].

Ekipman	Karışım	Yanma Odası	Kazan
Şema			
Ürünün Maliyeti	\dot{C}_3	\dot{C}_3	$(\dot{C}_6 - \dot{C}_5) + (\dot{C}_8 - \dot{C}_7)$
Yakıtın Maliyeti	$\dot{C}_1 + \dot{C}_2$	$\dot{C}_1 + \dot{C}_2$	$(\dot{C}_1 + \dot{C}_2) - (\dot{C}_3 + \dot{C}_4)$
Yardımcı Denklem	-	-	$\frac{(\dot{C}_6 - \dot{C}_5)}{(\dot{E}_6 - \dot{E}_5)} = \frac{(\dot{C}_8 - \dot{C}_7)}{(\dot{E}_8 - \dot{E}_7)}$

Şekil 2.3b: Ürün ve yakıt kuralına göre eksergoekonomik denge denklemleri [10].

- Sistemdeki bütün ekipmanların giriş ve çıkış ekserjilerinin hesaplanması
- Sistemdeki bütün ekipmanların yakıt ve ürün girdilerinin belirlenmesi
- Sistemdeki bütün ekipmanların ilk yatırım, işletme bakım ve hurda maliyetlerinin belirlenerek ekserji değerlerine atanması

Satın alma maliyeti (PEC) her bir ekipman için Çizelge 2.6 de gösterilmiştir. Isı değiştiriciler için PEC formulündeki TTD kazandan gelen buharın yoğunlaşma sıcaklığı ile ısı değiştiricisine gelen suyun çıkış sıcaklığı arasındaki fark olarak tanımlanmıştır. Buradaki a ifadesi ise 4 veya 6 olarak seçilebilir.

Çizelge 2.5 : Her ekipman için satın alma maliyetleri (PEC) [33].

Ekipman	PEC (\$)	Denklemler Numarası
Buhar Türbini	$6000W_T^{0,7}$	2.63
Kondenser	$1773\dot{m}_{buhar}$	2.64
Pompa	$3540W_p^{0,71}$	2.65
HRS	$4745\left(\frac{h_{buhar}}{\log(T_6 - T_7)}\right)^{0,8} + 11820\dot{m}_{buhar} + 658\dot{m}_{gaz}$	2.66
Dearatör	$145315\dot{m}_D^{0,7}$	2.67
Isı Değiştirici	$1000 * 0,2 * 3,3 * Q\left(\frac{1}{TTD + a}\right)^{0,1}$	2.68

Her bir ekipmanın toplam kapital yatırım maliyeti (TCI) yeni sistemler için [10];

$$TCI_k = 6,32PEC \quad (2.69)$$

İşletme ve bakım maliyetleri [10];

$$\dot{Z}_k^{OM} = 0,25PEC \quad (2.70)$$

Bir ekipmanın hurda değeri ise;

$$SV = \mu TCI \quad (2.71)$$

Yakıtın ekserjetik birim maliyeti ise [9];

$$c^{kömür} = \frac{Pr^{kömür}}{ER * LHV * 10^{-6} (GJ/kj)} \quad (2.72)$$

Burada $Pr^{kömür}$, ER ve LHV sırasıyla kömür satış fiyatı (TL), kömürün alt ısıl değeri ve döviz kuru (TL/\$) olarak belirtilmiştir.

Sistemde kullanılan elektriğin ekserjetik birim fiyatı ise [12];

$$c^w = \frac{Pr^w}{ER * 3600 \left(\frac{s}{h}\right) * 10^{-6} (GJ/kj)} \quad (2.73)$$

Burada Pr^w ve ER sırasıyla elektrik satış fiyatı (TL) ve döviz kuru (TL/\$) olarak belirtilmiştir.

Sistemde kullanılan bir ekipmanın maliyeti;

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{TCI} + \dot{Z}_k^{OM} - \dot{Z}_k^{SV} \quad (2.74)$$

Eksergoekonomik denge denklemi ile giren ekserji maliyetlerine ekipmanın maliyeti eklenecek çıkış ekserji maliyetleri bulunmaktadır.

$$\sum_g \dot{C}_k + \dot{Z}_k = \sum_\zeta \dot{C}_k \quad (2.75)$$

Ekserji akımlarının saatlik maliyeti ise;

$$\dot{C}_k = c_k \dot{E}x_k \quad (2.76)$$

Sistemin şimdiki parasal değeri ise;

$$PW = TCI + OM - SV * PWF \quad (2.77)$$

Yıllık yatırım maliyeti ödemeleri ise;

$$AC = PW * CRF \quad (2.78)$$

Sistemdeki k nıncı ekipmanın saatlik olarak ilk yatırım maliyeti;

$$\dot{Z}_k = \frac{AC}{t} \quad (2.79)$$

Sistemdeki her ekipmanın ilk yatırım maliyeti hesaplandıktan sonra eksergoekonomik denge denklemi her ekipman için yazılır. Ekipmandan çıkan n tane ekserji akımı için (n-1) tane yardımcı denkleme ihtiyaç vardır. Bu denklemler Şekil 2.3'deki örneklere göre bizim sistemimiz için yapılarak eksergoekonomik denge denklemleri Çizelge 2.6 te gösterilmiştir.

Önemli eksergoekonomik parametrelerden birisi bağıl maliyet farkıdır. Bu parametre ortalama ürün ve ortalama yakıt maliyeti arasındaki bağıl artışı temsil eder. Bu parametre sistemi değerlendirme ve sistemdeki bileşenlerin optimize edilmesinde önemli rol oynar.

$$r_{e,k} = \frac{c_{P,k} - c_{F,k}}{c_{F,k}} \quad (2.97)$$

Ortalama birim yakıt maliyeti [10],

$$c_{F,k} = \frac{\dot{C}_{F,k}}{\dot{E}x_{F,k}} \quad (2.98)$$

Çizelge 2.6 : Eksergoekonomik denge ve yardımcı denklemleri.

Ekipman	Ana Denklem	Yardımcı Denklem	Denklem Numarası
P1	$\dot{C}_{35} + \dot{C}_{w,p1} + \dot{Z}_{p1} = \dot{C}_1$	-	2.80
P2	$\dot{C}_{32} + \dot{C}_{w,p2} + \dot{Z}_{p2} = \dot{C}_{33}$	-	2.81
P3	$\dot{C}_{20} + \dot{C}_{w,p3} + \dot{Z}_{p3} = \dot{C}_{21}$	-	2.82
HPT	$\dot{C}_5 + \dot{Z}_{HPT} = \dot{C}_6 + \dot{C}_7 + \dot{C}_8 + \dot{C}_{w,HPT}$	$c_5 = c_6 = c_7 = c_{13} = c_{39} = c_8$	2.83
IPT	$\dot{C}_{11} + \dot{Z}_{IPT} = \dot{C}_{12} + \dot{C}_{14} + \dot{C}_{15} + \dot{C}_{16} + \dot{C}_{17} + \dot{C}_{w,IPT}$	$c_{11} = c_{12} = c_{14} = c_{15} = c_{16} = c_{17}$	2.84
LPT	$\dot{C}_{17} + \dot{Z}_{LPT} = \dot{C}_{18} + \dot{C}_{19} + \dot{C}_{w,LPT}$	$c_{17} = c_{18} = c_{19}$	2.85
D	$\dot{C}_{29} + \dot{C}_{34} + \dot{C}_{13} + \dot{Z}_D = C_{35}$	-	2.86
C	$\dot{C}_{19} + \dot{C}_{23} + \dot{C}_{22} + \dot{Z}_{cond} = \dot{C}_{20} + \dot{C}_{24}$	$c_{19} = c_{20}$	2.87
LPH1	$\dot{C}_{21} + \dot{C}_{18} + \dot{Z}_{LPH1} = \dot{C}_{22} + \dot{C}_{25}$	$c_{18} = c_{22}$	2.88
LPH2	$\dot{C}_{25} + \dot{C}_{31} + \dot{C}_{16} + \dot{Z}_{LPH2} = \dot{C}_{32} + \dot{C}_{26}$	$c_{16} = c_{32}$	2.89
-	$\dot{C}_{26} + \dot{C}_{33} = \dot{C}_{27}$	-	2.90
LPH3	$\dot{C}_{15} + \dot{C}_{27} + \dot{C}_{30} + \dot{Z}_{LPH3} = \dot{C}_{31} + \dot{C}_{28}$	$c_{15} = c_{31}$	2.91
LPH4	$\dot{C}_{14} + \dot{C}_{28} + \dot{Z}_{LPH4} = \dot{C}_{30} + \dot{C}_{29}$	$c_{14} = c_{30}$	2.92
HPH1	$\dot{C}_1 + \dot{C}_{12} + \dot{C}_{10} + \dot{Z}_{HPH1} = \dot{C}_2 + \dot{C}_{34}$	$c_{12} = c_{34}$	2.93
HPH2	$\dot{C}_2 + \dot{C}_{39} + \dot{C}_9 + \dot{Z}_{HPH2} = \dot{C}_3 + \dot{C}_{10}$	$c_{39} = c_{10}$	2.94
HPH3	$\dot{C}_3 + \dot{C}_6 + \dot{Z}_{HPH3} = \dot{C}_4 + \dot{C}_9$	$c_6 = c_9$	2.95
B	$\dot{C}_4 + \dot{C}_8 + \dot{C}_{36} + \dot{C}_{37} + \dot{Z}_{Boiler} = \dot{C}_5 + \dot{C}_{11} + \dot{C}_{38}$	$\frac{\dot{C}_5 - \dot{C}_4}{\dot{E}_5 - \dot{E}_4} = \frac{\dot{C}_{11} - \dot{C}_8}{\dot{E}_{11} - \dot{E}_8}$	2.96

Ortalama birim ürün maliyeti [10],

$$c_{P,k} = \frac{\dot{C}_{P,k}}{\dot{E}_{P,k}} \quad (2.99)$$

Sistemdeki maliyetler iki kategori altında toplanır. Birinci kategori ekserji ile alakalı olmayan satın alma maliyetleri (PEC), toplam yatırım maliyetleri (TCI), işletme ve bakım maliyetleridir. İkinci kategori ise ekserji ile alakalı olan ekserji kayıp ve yıkım maliyetleridir. Bir ekipmanın performansını değerlendirirken, hangi kategorideki maliyetin daha önemli olduğunun belirlenmesine yarayan bir önemli parametre de eksergoekonomik faktördür. k'nıncı ekipmanın eksergoekonomik faktörü ise [10];

$$f_{e,k} = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}} \quad (2.100)$$

Burada $\dot{C}_{D,k}$ ekserji yıkım maliyetidir ve Denklem 2.101 ile gösterilmektedir [10];

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \dot{E}x_{D,k} \quad (2.101)$$

2.4 Eksergoçevresel Analiz

Eksergoçevresel analiz de eksergoekonomik analiz gibi ekserjiye dayalı sistemdeki tersinmezliklerin yerini, büyüklüğünü, sebebini ve bunların çevreye etkisini tespit eder. Eksergoçevresel analiz ekserji ile yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA, YDD) birlikte değerlendiren bir yöntemidir.

LCA, bir ürünün veya bir sistemin hammadde elde edilmesinden başlayarak tüm üretim aşamalarını da dikkate alarak, sevkiyatı, kullanımı ve daha sonra da hurda olarak bertaraf edilmesinin çevreye verdiği zararları tespit eder. LCA beşikten-mezara mantığıyla bir ekipmanı üretmek için gerekli olan bütün prosesleri dikkate alarak analiz yapar. LCA yöntemlerinden birisi de eko-indikatör 99'dur. Eko-indikatör 99 yöntemi bir ekipman kullanımının çevreye verdiği zararı hesaplamak için üç farklı indikatör kullanılır. LCA değerlendirmesi insan sağlığı, ekosistem kalitesi ve doğal kaynaklar kategorilerine göre değerlendirilip bu üç kategori bir araya getirilerek eko indikatör puanı belirlenir.

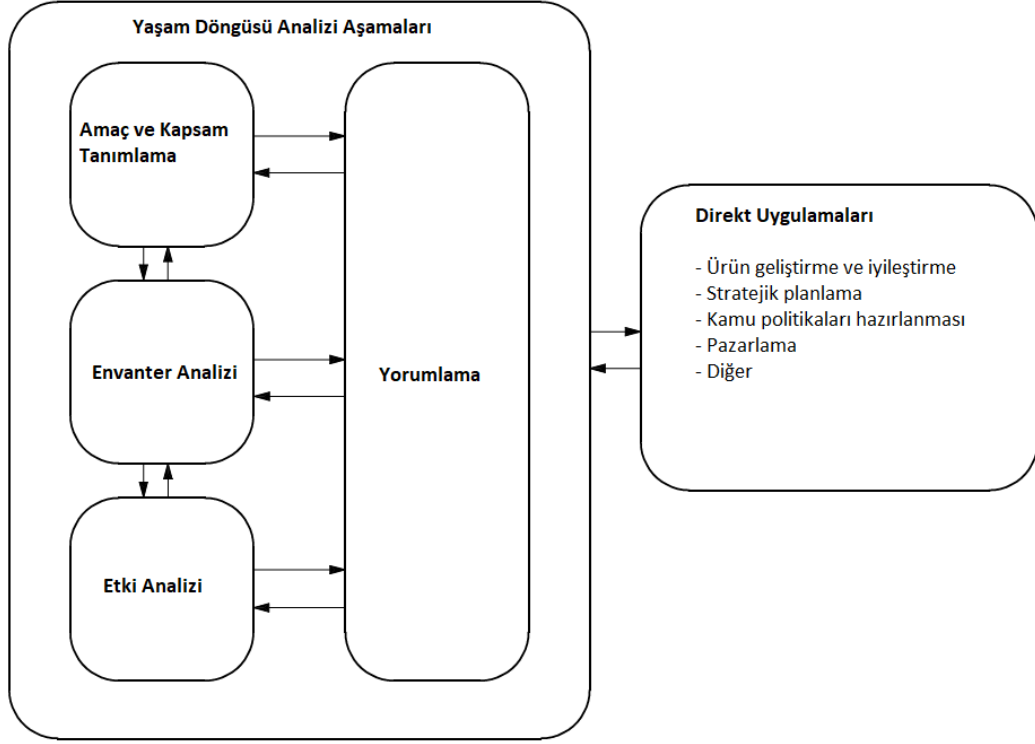
LCA analizi, ISO14040 - ISO14044 standartlarına göre yapılmaktadır [35]. LCA analizi 4 aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; Şekil 2.4'de görüldüğü gibi amaç ve kapsamın belirlenmesi, envanter analizinin yapılması, etki analizi ve sonuçların yorumlanması.

İlk aşamada, çalışmanın temel amacı, kapsamı, sistem sınırları, çalışmanın kime hitap ettiği ve hangi yöntem takip edileceği açıkça belirtilmektedir. Fonksiyonel birim (kg, kWh vb.) belirlenerek giren, çıkan hammadde ve ürün için referans oluşturulmaktadır [9].

Envanter analizi LCA analizinin ikinci aşamasıdır. Bu aşama, sistemdeki tüm prosesler için enerji ve malzeme girdi ve çıktı verilerinin toplandığı aşamadır. Veri toplama süreci zor bir süreçtir. Ölçümü direkt olarak yerinden yapmak veya literatürde yapılmış çalışmalardan bulmak gerekmektedir. Firmalar bazen verinin gizli kalması

gerektiğini düşünerek veri paylaşımında bulunmamaktadırlar. Bu gibi durumlarda LCA'nın bu aşaması zor bir durum haline gelmektedir [36].

LCA'nın üçüncü aşamasında ise bir önceki aşamada toplanan verilerin çevreye olan etkileri hesaplanmaktadır.



Şekil 2.4 : Yaşam Döngüsü Aşamaları [37].

Bu aşama dört alt basamaktan oluşmaktadır.

- Sınıflandırma: Envanterde toplanan verilerin kategorik olarak sınıflandırma aşamasıdır. Etki analizi, küresel ısınma, asidifikasyon, ozon tabakasının incelenmesi gibi etki kategorilerden oluşmaktadır. CO₂ emisyonu küresel ısınma kategorisi altında gösterilebilir.
- Karakterizasyon: Aynı emisyonları ve kaynakları uygun kategoriler altında gruplamak gerekmektedir. Örneğin, NO_x ve SO_x gibi bileşenleri küresel ısınma kategorisi altında gruplamak
- Farklı kategoriler altındaki çevresel etkilerin tek bir indikatör altında toplanması işlemidir. Uygun katsayılar ile her bir etki tek bir indikatör olarak belirlenmektedir.

- Normalizasyon: Farklı çevresel etkileri ortak bir referansa göre ayarlama işlemidir. Hangi çevresel etkinin daha önemli olduğunun ortaya konduğu aşamadır.
- Ağırlıklandırma: Toplam çevresel etkilerin tek bir indikatör altında toplandığı aşamadır.

Çizelge 2.7 : Ekipmanların hammadde oranları [39, 40] ve eko-indikatör 99 puanları [41].

Ekipman	Ekipman Bileşenleri	Eko-indikatör 99 (mpt/kg)
Türbin	%25 çelik	86
	%75 yüksek alaşımlı çelik	910
Pompa	%35 çelik	86
	%65 dökme demir	240
Isı Değiştiriciler ve Pompa	%26 çelik	86
	%74 yüksek alaşımlı çelik	910
Dearatör ve HRSG	%100 çelik	86

- **Çizelge 2.8 :** Ekipmanların ağırlık hesaplama formülleri [23].

Ekipman	Denklem	Denklem Numarası
Buhar Türbini	$W_{ST} = 4,9\dot{W}^{0,73}$	2.102
Pompa	$W_P = 0,175 \ln(\dot{W}) - 1,06$	2.103
Yoğuşum suyu pompası	$W_{CP} = 0,0061\dot{W}^{0,95}$	2.104
Isı değiştirici	$W_{HE} = 2,14\dot{Q}^{0,7}$	2.105
Dearatör	$W_D = 2,49\dot{m}_w^{0,7}$	2.106
HRSG, kazan	$W_{HRSG} = 8,424\dot{Q}^{0,87}$	2.107
Kondenser	$W_C = 0,073\dot{Q}^{0,99}$	2.108

LCA'nın son aşaması ise yorumlama aşamasıdır. Bu aşamada amaç ve kapsamda belirtilen amaçlar doğrultusunda sonuçlar yorumlanmaktadır. Bu sonuçlara göre karar alıcılara en çevreci olan tavsiyelerde bulunmaktadır.

Literatürde bir çok etki değerlendirme metotları vardır. Bunlar; eko-indicatör 95, eko-indikatör 99, çevresel öncelikli stratejiler (EPS), ReCiPE, Endüstriyel Ürünlerin

Çevresel Gelişimi (EDIP), Çevresel Ayak İzi (EF) [36]. Bu tezde kullanılan eko-indikatör 99 metodu Avrupa'daki çevre şartlarına göre geliştirilmiştir. Eko-indikatör 99 etki değerlendirme yöntemi, çevresel etkilerin insan sağlığı, ekosistem kalitesi ve kaynağın (hammadde) azalması üzerlerindeki etkilerini incelemektedir. Eko-indikatör 99 puanını hesaplamada ağırlıklandırma oranları insan sağlığı %40, ekosistem kalitesi %40 ve kaynak azalması %20 olarak belirlenmiştir.

Bir ekipmanı üretebilmek için gerekli olan hammadde girişlerini ve o ekipmanın ağırlığını bilmek sistemi boyutlandırmak için gereklidir. Ancak, bu bilgiler genellikle literatürde bulunmadığından dolayı hesaplar kabaca yapılmaktadır [8, 38].

Eksergoçevresel analiz de üç aşamadan oluşmaktadır. Bunlar;

- Sistemdeki bütün ekipmanların giriş ve çıkış ekserjilerinin hesaplanması
- Sistemdeki bütün ekipmanların çevreye etkilerinin LCA ile hesaplanması
- Hesaplanan çevre etkilerinin ekserji akımlarına atanması

Orhaneli Termik Santrali'nde kullanılan ekipmanları üretebilmek için gerekli olan hammadde yüzdeleri ve ilgili hammaddelerin eko-indikatör 99 puanı Çizelge 2.9 de gösterilmektedir. Çizelge 2.10 de de santralde kullanılan her bir ekipmanın ağırlığını hesaplamak için gerekli olan formüller listelenmiştir.

Her bir ekipmanın üretim sürecindeki çevresel etkileri (\dot{Y}_j^{CO}), operasyon ve bakım çevresel etkileri (\dot{Y}_j^{OM}) ve hurda olarak bertaraf etmenin çevresel etkileri (\dot{Y}_j^{DI}) olarak Denklem 2.109 de gösterilmiştir.

$$\dot{Y}_j = \dot{Y}_j^{CO} + \dot{Y}_j^{OM} + \dot{Y}_j^{DI} \quad (2.109)$$

Eksergoekonomik analizdekine benzer şekilde eksergoçevresel analizde de ekipmanın çevresel etkisi ekserji akımlarına atanır. İlgili akımın ekserjisi ile özgül çevresel maliyet (b_j) çarpılarak çevresel etki oranı (\dot{B}_j) bulunur. Her bir ekipman için eksergoçevresel denge denklemleri Çizelge 2.11'de gösterilmektedir.

$$\dot{B}_j = b_j \dot{E}x_j \quad (2.110)$$

Eksergoekonomik analizdeki bağıl maliyet farkı gibi eksergoçevresel analizde de bağıl çevresel etki farkı önemli bir parametredir. Ürünün ve yakıtın ortalama çevresel etkilerinin arasındaki bağıl artış Orhaneli Termik Santralini çevresel açıdan değerlendirmek için önemlidir.

Çizelge 2.9 : Eksergoçevresel denge denklemleri.

Ekipman	Ana Denklem	Yardımcı Denklem	Denklem Numarası
P1	$\dot{B}_{35} + \dot{B}_{w,p1} + \dot{Y}_{p1} = \dot{B}_1$	-	2.111
P2	$\dot{B}_{32} + \dot{B}_{w,p2} + \dot{Y}_{p2} = \dot{B}_{33}$	-	2.112
P3	$\dot{B}_{20} + \dot{B}_{w,p3} + \dot{Y}_{p3} = \dot{B}_{21}$	-	2.113
HPT	$\dot{B}_5 + \dot{Y}_{HPT} = \dot{B}_6 + \dot{B}_7 + \dot{B}_8 + \dot{B}_{w,HPT}$	$b_5 = b_6 = b_7 = b_{13} = b_{39} = b_8$	2.114
IPT	$\dot{B}_{11} + \dot{Y}_{IPT} = \dot{B}_{12} + \dot{B}_{14} + \dot{B}_{15} + \dot{B}_{16} + \dot{B}_{17} + \dot{B}_{w,IPT}$	$b_{11} = b_{12} = b_{14} = b_{15} = b_{16} = b_{17}$	2.115
LPT	$\dot{B}_{17} + \dot{Y}_{LPT} = \dot{B}_{18} + \dot{B}_{19} + \dot{B}_{w,LPT}$	$b_{17} = b_{18} = b_{19}$	2.116
D	$\dot{B}_{29} + \dot{B}_{34} + \dot{B}_{13} + \dot{Y}_D = \dot{B}_{35}$	-	2.117
C	$\dot{B}_{19} + \dot{B}_{23} + \dot{B}_{22} + \dot{Y}_{cond} = \dot{B}_{20} + \dot{B}_{24}$	$b_{19} = b_{20}$	2.118
LPH1	$\dot{B}_{21} + \dot{B}_{18} + \dot{Y}_{LPH1} = \dot{B}_{22} + \dot{B}_{25}$	$b_{18} = b_{22}$	2.119
LPH2	$\dot{B}_{25} + \dot{B}_{31} + \dot{B}_{16} + \dot{Y}_{LPH2} = \dot{B}_{32} + \dot{B}_{26}$	$b_{16} = b_{32}$	2.120
-	$\dot{B}_{26} + \dot{B}_{33} = \dot{B}_{27}$	-	2.121
LPH3	$\dot{B}_{15} + \dot{B}_{27} + \dot{B}_{30} + \dot{Y}_{LPH3} = \dot{B}_{31} + \dot{B}_{28}$	$b_{15} = b_{31}$	2.122
LPH4	$\dot{B}_{14} + \dot{B}_{28} + \dot{Y}_{LPH4} = \dot{B}_{30} + \dot{B}_{29}$	$b_{14} = b_{30}$	2.123
HPH1	$\dot{B}_1 + \dot{B}_{12} + \dot{B}_{10} + \dot{Y}_{HPH1} = \dot{B}_2 + \dot{B}_{34}$	$b_{12} = b_{34}$	2.124
HPH2	$\dot{B}_2 + \dot{B}_{39} + \dot{B}_9 + \dot{Y}_{HPH2} = \dot{B}_3 + \dot{B}_{10}$	$b_{39} = b_{10}$	2.125
HPH3	$\dot{B}_3 + \dot{B}_6 + \dot{Y}_{HPH3} = \dot{B}_4 + \dot{B}_9$	$b_6 = b_9$	2.126
B	$\dot{B}_4 + \dot{B}_8 + \dot{B}_{36} + \dot{B}_{37} + \dot{Y}_{Boiler} = \dot{B}_5 + \dot{B}_{11} + \dot{B}_{38}$	$\frac{\dot{B}_5 - \dot{B}_4}{\dot{E}_5 - \dot{E}_4} = \frac{\dot{B}_{11} - \dot{B}_8}{\dot{E}_{11} - \dot{E}_8}$	2.127

$$r_{b,k} = \frac{b_{P,k} - b_{F,k}}{b_{F,k}} \quad (2.128)$$

Yakıtın ortalama birim çevresel etkisi [10],

$$b_{F,k} = \frac{\dot{B}_{F,k}}{\dot{E}_{x_{F,k}}} \quad (2.129)$$

Ürünün ortalama birim çevresel etkisi[10],

$$b_{P,k} = \frac{\dot{B}_{P,k}}{\dot{E}_{x_{P,k}}} \quad (2.130)$$

Sistemde kullanılan ekipmanların çevresel etkileri iki kategori altında toplanmaktadır. Birinci kategori ekserji ile alakalı olmayan çevresel etkilerdir. Bunlar hammaddeden

bir ürün haline gelirken ve bu ürüne yaşamı boyunca uygulanan işletme ve bakımdan dolayı ortaya çıkan çevresel etkilerdir. İkinci kategori ise ekserji yıkımından dolayı oluşan çevresel etkilerdir. Eksergoçevresel faktör hangi kategorideki çevresel etkinin bağıl olarak katkısını belirler. Eksergoçevresel faktör Denklem 2.131 ile gösterilmektedir;

$$f_{b,k} = \frac{\dot{Y}_k}{Y_k + \dot{B}_{D,k}} \quad (2.131)$$

Burada $\dot{B}_{D,k}$ ekserji yıkımının çevreye olan etkisidir ve Denklem 2.132 ile gösterilmektedir [10];

$$\dot{B}_{D,k} = b_{F,k} \dot{E}x_{D,k} \quad (2.132)$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, Bursa Orhaneli Termik Santrali'nin enerji ve ekserji analizinin sonuçları irdelenecektir. Daha sonra ekonomik ve çevresel açıdan da dikkate alınarak eksergonomik ve eksergoçevresel analizinin sonuçları incelenecektir.

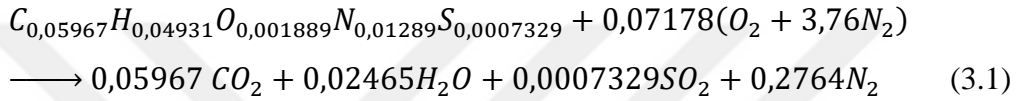
3.1 Enerji Analizi

Orhaneli Termik Santrali'nin enerji analizini yapabilmek için sistemin dizayn değerleri kullanılmıştır. Sistemin dizayn değerlerine sadık kalınarak tüm sistem yeniden tasarlanmıştır. Sisteme genel olarak bakacak olursak, yüksek basınç ısıtıcılarından geçerek kazanda üretilen kızgın buhar 175,56 kg/s kütleli debi, 127,5 bar basınç ve 540 °C sıcaklık ile yüksek basınç türbinine gider. Bir miktar basıncını kaybeden kızgın buhar 151,83 kg/s kütleli debi, 24,81 bar basınç ve 332 °C sıcaklık ile tekrardan kazana gönderilip, kazanda kızdırma işlemine tabi tutulup sıcaklığı 540 °C olarak tekrardan orta basınç türbinine gönderilir. Orta basınç türbininden 126,58 kg/s debi, 1,2 bar basınç ve 175,79 °C sıcaklık ile çıkan buhar alçak basınç türbinine gönderilip, 121,86 kg/s kütleli debi, 0,07 bar basınç ve 39,1 °C sıcaklık ile kondensere gider. Kondenserde yoğunlaşan buhar, sırasıyla pompa, alçak basınç ısıtıcıları, deaerasyon ve yüksek basınç ısıtıcılarından geçerek kazana gelir.

Sistemde kullanılan su, kızgın su buharı ve baca gazlarının termodinamik özellikleri EES paket programı kullanılarak belirlenmiştir. EES programından alınamayan özellikler [5, 42] kaynağından alınmıştır. Ardından sistemdeki bütün akım noktalarının basınç ve sıcaklığa bağlı olarak entalpi, entropi değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 3.1'de belirtilen sistem girdileri ile yüksek basınç türbininde 62.956 kW, orta basınç türbininde 104.176 kW ve alçak basınç türbininde 48.415 kW güç üretilmiştir. Sistemde üretilen toplam güç ise 215.547 kW' tır. Sistemde kullanılan 3 adet pompa seti ise sırasıyla, pompa 1 (P1) 2.915 kW, pompa 2 (P2) 38,23 kW ve pompa 3 (P3) ise 257,2 kW güç tüketmiştir. Sistemde üretilen güç ile sistemdeki pompalar çalıştırıldığından dolayı sistemden 212.337 kW net güç elde edilmiştir. Orhaneli termik santralinden 210 MW net güç üretilirken, bu tezde tasarlanan sistemde ise

212,337 MW elektrik üretilmektedir. Orhaneli Termik Santrali'nin sistemi %1,11 fark ile tasarlanmıştır.

Kazanda kuru külsüz kömür yakıldığı kabul edilmiş olup ilgili kömürün özellikleri Çizelge 2.1 de gösterilmektedir. Denklem 2.6'dan 2.11'e kadar olan denklemler kullanılarak kömürün kapalı formülü $C_{0,05967}H_{0,04931}O_{0,001889}N_{0,01289}S_{0,0007329}$ olarak bulunmuştur. Hava içerisinde bulunan CO₂, H₂O, argon, karbonmonoksit vb. diğer gazlar ihmal edilmiştir. Havanın özellikleri %79 azot (N₂) ve %21 oksijen (O₂) olarak kabul edilmiştir. Kömürü yakmak için fazladan hava kullanılmamıştır, yani hava fazlalık katsayısı 1 olarak kabul edilmiştir. Buna göre yanma reaksiyonu denge denklemi;



Sistemde kullanılan pompa setlerinin izentropik verimleri sırasıyla 0,8 (P1), 0,8 (P2) ve 0,74 (P3) olarak kabul edilmiştir. Sistemde bulunan yedi adet ısı değiştiricinin suyun yoğunlaştığı hat üzerinde genişleme vanası bulunmaktadır. Genişleme vanası izentalpik olarak kabul edildiğinden dolayı ayrı bir numaralandırma yapılmamıştır.

3.2 Ekserji Analizi

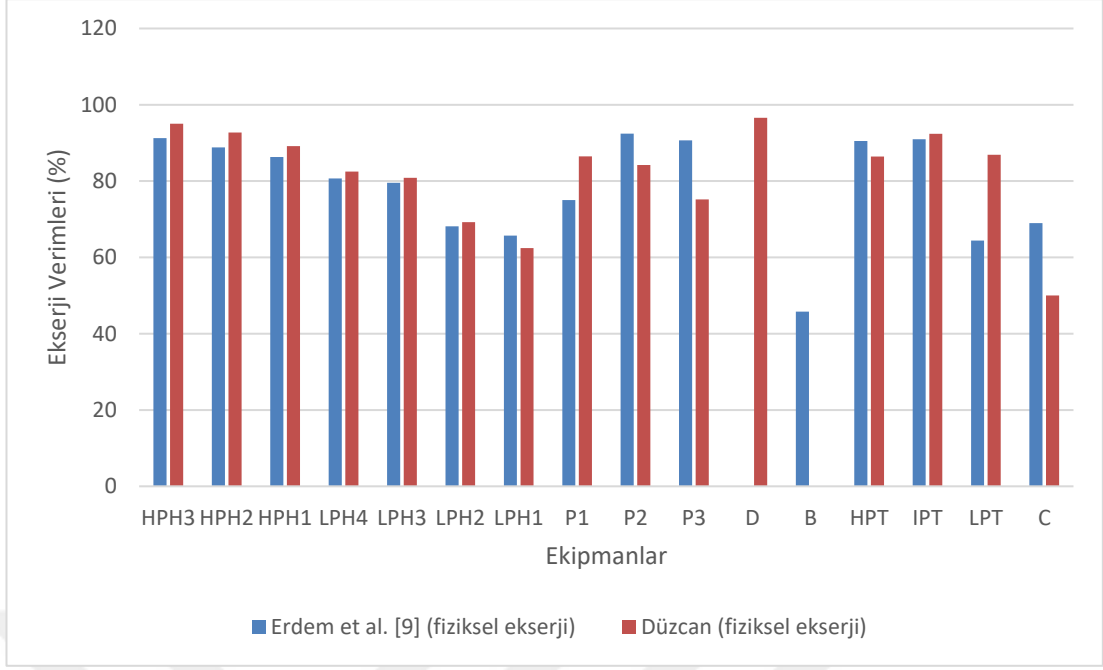
Orhaneli Termik Santrali'ne ait sistemdeki her bir noktanın termodinamik özellikleri 3.1 nolu bölümde hesaplanmıştır. Bu bölümde ise her bir nokta için fiziksel ve kimyasal ekserjiler hesaplanacaktır. Ekserji analizinde 2.1.3 bölümünde belirtildiği gibi kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edilmiştir.

Ekserji analizi için çevre şartlarının belirlenmesi gerekmektedir. Çevre şartları 25 °C and 1,01325 bar olarak 2.1.3 bölümünde belirtilmiştir.

Erdem et al. [9]'daki gibi kimyasal ekserjiler ihmal edilip, sadece fiziksel ekserjiye bağlı ekserji verimleri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Bazı farklılıklar tasarım değerlerinin farklı olmasından dolayıdır.

Çizelge 3.1 : Sistemin termodinamik değerleri.

Nokta	m (kg/s)	P (bar)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Enerji (kW)	Ekserji (kW)
1	175,56	127,5	168,26	718,21	2,010	126089	30463
2	175,56	127,5	186,83	798,95	2,189	140264	35259
3	175,56	127,5	225,05	969,67	2,545	170235	46574
4	175,56	127,5	244,5	1059,91	2,723	186078	53116
5	175,56	127,49	540	3447,74	6,588	605285	353785
6	7,5	36,28	379,14	3171,92	6,750	23789	12684
7	16,22	24,81	329,92	3081,07	6,771	49975	25860
8	151,83	24,81	332	3085,9	6,779	468532	242410
9	7,5	36,28	244,64	1059,71	2,744	7948	2220
10	21,28	24,81	223,55	959,99	2,550	20429	5406
11	151,83	24,32	540	3552,62	7,451	539394	282834
12	4,08	11,18	446,97	3363,26	7,558	13722	6703
13	2,44	24,81	329,92	3081,07	6,771	7518	3897
14	8,53	5,88	358,89	3184,9	7,587	27167	12405
15	5,25	2,59	257,05	2983,51	7,615	15663	6535
16	7,39	1,2	175,79	2826,51	7,647	20888	7967
17	126,58	1,2	175,79	2826,51	7,647	357780	136491
18	4,72	0,26	66,25	2589,54	7,722	12223	3868
19	121,86	0,07	39,1	2438,39	7,845	297142	76915
20	126,58	0,07	39,1	163,77	0,560	20730	6481
21	126,58	15	39,27	165,8	0,562	20987	6675
22	4,72	0,26	66,25	277,36	0,909	1309	287,2
23	4166,67	1	24	100,74	0,353	419750	208131
24	4166,67	1	39,95	167,39	0,572	697459	214416
25	126,58	15	59,91	252,06	0,829	31906	7503
26	126,58	15	95,78	402,45	1,258	50942	10356
27	147,75	15	97,08	407,94	1,273	60273	12245
28	147,75	15	119,37	502,08	1,520	74182	15277
29	147,75	15	153,39	647,4	1,875	95653	21110
30	8,53	5,88	158,07	667,07	1,923	5690	1264
31	13,78	2,59	128,57	540,27	1,619	7445	1542
32	21,17	1,2	104,7	439	1,360	9294	1863
33	21,17	15	104,88	440,8	1,361	9332	1895
34	25,36	11,4	185,65	788,08	2,194	19986	4781
35	175,56	7,2	166	701,61	2,002	123175	27942
36	63,89	1	25			0	1,11E+06
37	629,76	1	25	104,92	0,367	66074	0
38	694,04	1	126,85			0	259793
39	13,78	24,81	329,92	3081,07	6,771	42457	21963



Şekil 3.1 Karşılaştırmalı fiziksel ekserjiye dayalı ekserji verimleri

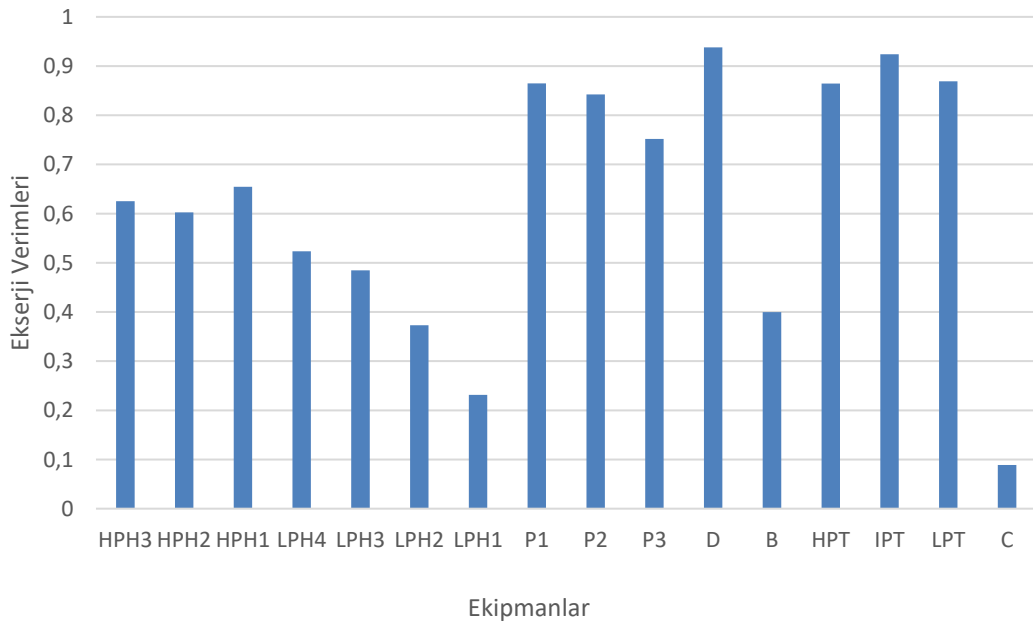
Çevre şartlarını belirledikten sonra her bir noktanın fiziksel ekserjisi Denklem 2.34 ile hesaplanmıştır. Kimyasal ekserji için ise Denklem 2.35 kullanılabilir. Eğer bir ısı değiştiricide yoğuşma yok ise ekserji denkliğinde kimyasal ekserji ihmal edilebilir, yoğuşma var ise ihmal edilemez. Orhaneli Termik Santrali sisteminde kullanılan ısı değiştiricilerin hepsinde (HPH, LPH ve C) yoğuşma mevcuttur. Çizelge 2.3'e göre yoğuşmuş suyun kimyasal ekserjisi 900 kJ/kmol, su buharının kimyasal ekserjisi ise 9500 kJ/kmol olarak belirtilmiştir.

Kazandan çıkan baca gazlarının kimyasal ekserjileri Denklem 2.35 ile hesaplanmıştır ve toplam ekserjileri Çizelge 3.1'de gösterilmektedir. Fiziksel ve kimyasal ekserjiler tüm noktalar için hesaplandıktan sonra her bir noktanın toplam ekserjisi Denklem 2.36 ile hesaplanarak Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

Tersinmezliklerden dolayı sistemde kaybolan ekserjiler her bir ekipman için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Çizelge 3.2'e bakıldığında sistemde en çok ekserji yıkımı yanma reaksiyonunun olduğu kazanda 512,321 MW ile meydana gelmektedir. Ardından 64,436 MW ile en çok ekserji yıkımı kondenserde gerçekleşmektedir. Bu iki ekipmandan sonraki en yüksek ekserji yıkımı sırasıyla yüksek basınç türbini orta basınç türbini, alçak basınç türbini, alçak ve yüksek basınç ısıtıcılarında meydana gelmektedir.

Çizelge 3.2 : Sistemdeki her ekipmanın ekserji verimi ve ekserji yıkımı.

Ekipman	Ekserji Verimleri	Ekserji Yıkımı (kW)
HPH3	0,6252	3922
HPH2	0,6026	7462
HPH1	0,6544	2533
LPH4	0,5235	5308
LPH3	0,4847	3224
LPH2	0,3731	4793
LPH1	0,2314	2752
P1	0,8648	394,2
P2	0,8422	6,032
P3	0,7518	63,85
D	0,938	1845
B	0,3997	512321
HPT	0,8644	9875
IPT	0,9241	8557
LPT	0,8691	7293
C	0,08887	64436



Şekil 3.2 : Sistemdeki ekipmanların ekserji verimleri.

Sistemdeki bütün bileşenlerin ekserji verimleri Denklem 2.51’de belirtilen bağıntıya göre ayrı ayrı hesaplanmış ve grafik Çizelge 3.2 ve Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Buna göre sistemdeki en yüksek ekserji verimine sahip olan ekipman %93,8 ile dearatördür.

Ardından %92,41 ile orta basınç türbini, %86,91 ile alçak basınç türbini ve %86,44 ile yüksek basınç türbini takip etmektedir. Yüksek basınç ısıtıcılarının ekserji verimleri sırasıyla %62,52, %60,26 ve %65,44; alçak basınç türbinlerinin ekserji verimleri ise sırasıyla %52,35, %48,47, %37,31 ve %23,14 olarak hesaplanmıştır. Sistemdeki en düşük ekserji verimine sahip olan ekipman ise %8,88 ile kondenserdir.

Çizelge 3.3 Literatür ile karşılaştırmalı olarak ekserji verimleri

Ekserji Verimleri (%)									
	Zhu vd. [43]	Topal vd. [11]	Rocha vd. [44]	Uysal vd. [13]	Bolatturk vd. [45]	Adibhatla vd. [46]	Erdem vd. [9]	Düzcan	Düzcan
HPH3	95,5		87,03	87,53	88	90	91,27	95,02	62,52
HPH2	95		99,92	65,1	81	90	88,81	92,73	60,26
HPH1	91,7		91,65			90	86,33	89,15	65,44
LPH4	91,4		84,8	84,83	78	80	80,71	82,48	52,35
LPH3	91		85,25	64,21	78	80	79,57	80,84	48,47
LPH2	90,6		77,7		75	75	68,15	69,25	37,31
LPH1	76,6		67,59		74	65	65,72	62,44	23,14
P1		75,51		75,74	95		75,03	86,48	86,48
P2		61,13		75,44	58		92,42	84,22	84,22
P3				51,1			90,68	75,18	75,18
D		98,63	97,56			91	-	96,58	93,8
B	53,5	43,19	50,67	33,24	72	40	45,77	-	39,97
HPT	93,8	90,15	95,33	96,6	93	92	90,51	86,44	86,44
IPT	96,4		96,41		91		90,97	92,41	92,41
LPT	95		94,3	97,55	91		64,42	86,91	86,91
C		99,14	-	29,95			68,98	50,03	8,887
Ekserji Analizi	F	F + K	F + K	F + K	F + K	-	F	F	F + K

Literatürde 7 adet kömür yakıtlı termik santralin ekserji verimleri Çizelge 3.3’de gösterilmektedir. İlgili makalelerde analizde fiziksel ekserji (F) ve kimyasal ekserjiden (K) hangilerinin kullanıldığı belirtilmiştir. Orhaneli Termik Santrali’nin ekserji analizinde sadece fiziksel ekserji dikkate alınarak ve hem fiziksel hem de kimyasal ekserjisi dikkate alınarak sonuçlar Çizelge 3.3’de gösterilmektedir. Fiziksel ekserjiye dayalı ekserji verimleri Erdem vd. [9] ile örtüşmektedir. Alçak ve yüksek basınç ısıtıcılar verimleri, buhar türbin verimleri örtüşmektedir. Bazı farklılıkların nedeni tasarım değerlerinin farklı olmasından dolayıdır. Bu sonuçlar, literatürdeki sonuçlar ile de örtüşmektedir. Kimyasal ekserjiler de dikkate alındığında, pompa, kazan, buhar türbini ekserji verimleri Topal vd. [11], Rocha vd. [44], Uysal vd. [13] ve Bolatturk

[45] ile örtüşmektedir. Kondenser ekserji verimi Topal vd. [11]'de %99,14 iken ve Uysal vd. [13]' de %29,95 olarak hesaplanmıştır. Bunun asıl nedeni, kütleli debilerin farklılık göstermesinden dolayıdır. Yüksek ve alçak basınç ısıtıcılarında ve kondenserde türbinlerden gelen kızgın buhar yoğunluğundan dolayı kimyasal ekserji yakıt (F kuralı) kısmını arttırarak, ekserji veriminin düşmesine sebep olmaktadır. Yani yoğunlaşan buhar kütlelerinin artması ekserji veriminin azalmasına neden olmaktadır.

3.3 Eksergoekonomik Analizi

Orhaneli Termik Santrali'nin enerji ve ekserji analizi 3.1 ve 3.2 bölümlerinde yapıldı. Sistemdeki her bir akım noktası için ekserji değerleri hesaplandıktan sonra bu bölümde sisteme ait maliyet değerleri hesaplanacaktır.

Bir ekipmana giren çıkan akımların sıcaklıkları, debisi ve ilgili ekipmandaki transfer olan ısı, enerji analizi ile hesaplanmıştır. Bu parametreler bilinerek Çizelge 2.5'da belirtilen formüller kullanılarak her bir ekipmanın satın alma maliyeti (PEC) hesaplanmıştır. Her bir ekipmana ait hesaplanan satın alma maliyeti Çizelge 3.4' de gösterilmektedir.

Çizelge 3.4 : Sistem komponentelerinin eksergoekonomik analizi sonuçları.

Ekipmanlar	PEC (\$)	\dot{Z}_k^{TCI} (\$/h)	r (%)	f (%)
HPH3	872100	83,66	75,95	21,07
HPH2	1,70E+06	163,30	44,54	17,70
HPH1	799227	76,67	7,81	19,20
LPH4	1,14E+06	109,50	115,10	20,90
LPH3	709228	68,04	135,10	21,27
LPH2	972770	93,32	209,90	19,96
LPH1	570516	54,73	416,70	20,30
P1	942469	90,41	57,27	72,70
P2	45365	4,35	175,60	89,33
P3	172283	16,53	132,20	75,03
D	5,41E+06	519,20	20,64	68,01
B	3,85E+06	368,90	154,30	2,65
HPT	1,37E+07	1317,00	41,86	62,53
IPT	1,95E+07	1873,00	31,24	73,71
LPT	1,14E+07	1095,00	44,04	65,80
C	216060	20,73	1030,00	0,410

Ekonomik analiz için bileşik faiz oranı (i) %10, sistem ömrü (n) ise 20 yıl olarak kabul edilmiştir. Sistemindeki ekipmanların hurda değerini hesaplamak için gerekli olan μ

parametresi %12 olarak kabul edilmiştir [47]. Termik santralin tam yük altında bir yılda 8200 saat çalıştığı kabul edilmiştir. Bu belirtilen verileri kullanarak şimdiki değer faktörü (PWF) 0,1353, ilk yatırım maliyeti geri kazanım faktörü (CRF) ise 0,1216 olarak hesaplanmıştır.

Bu verileri kullanarak her ekipmanın ilk yatırım, işletme bakım ve hurda değerinin saatlik maliyet akışı (\dot{Z}_k^{TCI}) Çizelge 3.3'de gösterilmektedir. Orta basınç türbini, 1873 \$/h ile en yüksek saatlik yatırım maliyet değerine sahiptir. Ardından, yüksek ve alçak basınç türbinleri 1317 \$/h ve 1095 \$/h ile sıralanmaktadır. En düşük saatlik yatırım maliyeti ise 4,35 \$/h ile alçak basınç ısıtıcısının (LPH2) yoğunlaşan su hattındaki pompa (P2) setidir.

Kömür fiyatı Türkiye Kömür İşletmeleri tarafından belirlenmektedir. Kömürün birim fiyatı 471 TL/ton olarak belirtilmiştir [48]. Döviz kuru ise Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası (TCMB) verilerine göre 5,20 TL/\$ olarak kabul edilmiştir [49]. Bu verilere göre kömürün enerjetik değeri $c^{kömür} = 4,503$ \$/GJ olarak hesaplanmıştır.

Sistemde pompalar tarafından kullanılan elektriğin maliyetinin hesaplanması gerekmektedir. Enerji Piyasası Denetleme Kurumu (EPDK) tarafından elektrik fiyatı 0,447948 TL/kWh olarak belirlenmiştir [50]. Yukarıda belirtilen döviz kuru ile elektriği dolar cinsinden değeri $c^w = 23,93$ \$/GJ olarak hesaplanmıştır. Suyun ve havanın birim ekserji maliyeti "0" olarak kabul edilmiştir.

Sistemde 39 adet (buhar, su ve kömür) eksergoekonomik akım vardır. Bir tane pompalarda kullanılan elektrik eksergoekonomik akımı ve üç adet türbinden elektrik üretim eksergoekonomik akımı vardır. Toplam 43 bilinmeyenli bu lineer denklem sistemi Çizelge 2.6'daki denklemler kullanılarak EES programı vasıtasıyla çözülmüştür. Buna göre her noktaya ait ekserji akımlarının değerleri (GJ/h), her bir nokta için hesaplanan birim ekserji maliyet akımları c (\$/GJ) ve yine her nokta için hesaplanan ekserji akım maliyetleri \dot{C} (\$/h) Çizelge 3.4'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.4'e göre birim ekserji maliyeti en yüksek olan nokta 23,4 \$/GJ ile P1 pompa çıkışı olan (35. nokta) ekserji akımıdır. Ekserji birim maliyeti sıfır olan hava ve su haricinde ekserji birim maliyeti en düşük nokta kondenserdeki 24 numaralı nokta olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.5 : Orhaneli Termik Santraline ait ekserji, ekserji maliyet akımı ve birim ekserji maliyetleri.

Nokta	Ekserji (GJ/h)	c (\$/GJ)	C (\$/h)
1	109,7	43,81	4804,0
2	126,9	43,04	5463,0
3	167,7	42,50	7126,0
4	191,2	42,08	8046,0
5	1274	22,19	28264,0
6	45,66	22,19	1013,0
7	93,1	22,19	2066,0
8	872,7	22,19	19366,0
9	7,992	22,19	177,4
10	19,46	22,19	431,9
11	1018	21,69	22084,0
12	24,13	21,69	523,4
13	14,03	22,19	311,3
14	44,66	21,69	968,6
15	23,53	21,69	510,3
16	28,68	21,69	622,1
17	491,4	21,69	10658,0
18	13,92	21,69	302,0
19	276,9	21,69	6006,0
20	23,33	21,69	506,1
21	24,03	22,67	544,8
22	1,034	21,69	22,4
23	749,3	0,00	0,0
24	771,9	7,18	5543,0
25	27,01	32,54	879,1
26	37,28	42,10	1569,0
27	44,08	39,08	1723,0
28	55	41,44	2279,0
29	76	42,88	3259,0
30	4,549	21,69	98,7
31	5,552	21,69	120,4
32	6,708	21,69	145,5
33	6,824	22,44	153,1
34	17,21	21,69	373,3
35	100,6	44,36	4462,0
36	4008	5,63	22568,0
37	0	0,00	0,0
38	935,3	0,00	0,0
39	79,07	22,19	1755,0

Her bir ekipman için giren ekserji akımlarının ortalama birim yakıt maliyeti ($c_{P,k}$) ve çıkan ekserji akımlarının ortalama birim ürün maliyeti ($c_{F,k}$), sırasıyla Denklem 2.98 ve 2.99 ile hesaplanmıştır. Ortalama birim ürün maliyeti ile ortalama birim yakıt maliyeti arasındaki izafi maliyet farkı Çizelge 3.3’de gösterildiği gibi kondenserde %1036, alçak basınç ısıtıcısında (LPH1) %538,7; alçak basınç ısıtıcısında (LPH2) ve pompada (P2) %175,6; en düşük ise %36,75 ile deaeratorde olmaktadır.

Yatırım maliyetleri ile ekserji yıkım maliyetlerini karşılaştıran eksergoekonomik faktör ($f_{e,k}$) Denklem 2.100 ile hesaplanmıştır. Buna göre en yüksek eksergoekonomik faktör Çizelge 3.4’de gösterildiği üzere, pompada (P2) %89,33, orta basınç türbininde %73,71; alçak basınç türbininde %65,8 ve deaeratorde %68,01; en düşük ise kondenserde %0,410 olarak hesaplanmıştır.

3.4 Eksergoçevresel Analizi

Bursa Orhaneli Termik Santrali’nin enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizleri 3.1, 3.2 ve 3.3 bölümlerinde hesaplanmıştır. Bu bölümde her bir ekipmanın yaşam döngüsü analizi ile çevreye verdikleri zarar tespit edilecektir. Bu hesaplanan LCA sonuçları ekserji akımlarına atanarak sistemin eksergoçevresel analizi gerçekleştirilecektir.

Sistemdeki her bir ekipmana giren çıkan akımların sıcaklık ve debileri, pompada tüketilen güç miktarı, türbinde üretilen güç miktarı ve ısı değiştiricilerde (yüksek basınç ısıtıcıları, alçak basınç ısıtıcıları ve kondenser) transfer olan ısı miktarları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu veriler ile Çizelge 2.9’da belirtilen formüller kullanılarak sistemdeki her bir bileşenin ağırlıkları hesaplanmış ve Çizelge 3.6’de gösterilmiştir.

Eksergoekonomik analizdeki gibi, işletme ve bakım çevresel etkileri, üretimden kaynaklanan çevresel etkilerin %25’i ve hurda olarak bertaraf etmenin çevresel etkileri ise %12 olarak kabul edilmiştir. Sistem bir yılda 8200 saat (t) boyunca tam yük altında çalıştığı ve sistem ömrü 20 yıl (n) olarak kabul edilmiştir. Bu veriler ile hesaplanan sistem bileşenlerinin saatlik çevresel etkileri (Y_j) Çizelge 3.5’de gösterilmektedir. Genel olarak bakıldığında, ekipmanların üretim, işletme bakım ve bertaraf edilme süreci için en yüksek saatlik çevresel etkiler yüksek ve alçak basınç ısıtıcılarında gerçekleşmektedir.

Çizelge 3.6 : Sistem komponentelerinin eksergoçevresel analizi sonuçları.

Ekipmanlar	w (kg)	\dot{Y}_j (mPts/h)	r (%)	f (%)
HPH3	1,86E+06	10829,0	61,22	2,084000
HPH2	2,91E+06	16922,0	67,10	1,718000
HPH1	1,72E+06	10018,0	54,42	2,970000
LPH4	2,31E+06	13398,0	92,81	1,935000
LPH3	1,70E+06	9887,0	108,90	2,342000
LPH2	2,12E+06	12316,0	171,40	1,970000
LPH1	1,44E+06	8346,0	340,00	2,316000
P1	1396	2,2	15,64	0,025020
P2	637,7	1,0	18,87	0,741500
P3	971,3	1,5	33,05	0,107400
D	92745	66,6	6,61	0,018240
B	643714	462,5	150,20	0,001932
HPT	89027	523,6	15,69	0,040860
IPT	126658	744,9	8,22	0,068020
LPT	74077	435,6	15,07	0,046690
C	19165	111,4	1128,00	0,001352

Tasarımcılar için eko-indikatör 99 manuelinde elektriğin çevresel etkisi 22 mPts/kWh olarak belirtilmiştir [41]. Emisyonların çevresel etkileri ise CO₂ ve NO₂ için sırasıyla 5,4545 mPts/kg ve 1499,37 mPts/kg olarak belirtilmiştir [8]. Kömür üretiminin çevresel etkisi ise 4,09e-2 Pts/kWh olarak belirtilmiştir [51].

Eksergoekonomik analizdeki gibi sistemde 39 adet (buhar, su ve kömür) eksergoçevresel akım vardır. Bir tane pompalarda kullanılan elektrik eksergoçevresel akımı ve üç adet türbinden elektrik üretim eksergoçevresel akımı vardır. Toplam 43 adet bilinmeyenli bu lineer denklem sistemi Çizelge 2.11 deki denklemler kullanılarak EES programı yardımı ile çözülmüştür. Bu sonuçlara göre her noktaya ait özgül çevresel maliyetler b_j (mPts/GJ) ile ekserjetik çevresel etki değerleri \dot{B}_j (mPts/h) Çizelge 3.6'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.6'e göre özgül çevresel maliyeti en yüksek olan nokta 61.448 mPts/GJ ile alçak basınç ısıtıcısının (LPH2) çıkışındaki 26 numaralı noktada gerçekleşmektedir. Özgül çevresel maliyeti sıfır noktalar haricinde en düşük nokta 6041 mPts/GJ ile 38 numaralı noktada gerçekleşmiştir.

Çizelge 3.7 : Orhaneli Termik Santraline ait ekserji, ekserji çevresel akımı ve birim çevresel maliyetleri.

Nokta	Ekserji (GJ/h)	b (mPts/GJ)	B (mPts/h)
1	109,7	54340,0	5,96E+06
2	126,9	54489,0	6,92E+06
3	167,7	55879,0	9,37E+06
4	191,2	56152,0	1,07E+07
5	1274	36032,0	4,59E+07
6	45,66	36032,0	1,65E+06
7	93,1	36032,0	3,35E+06
8	872,7	36032,0	3,14E+07
9	7,992	36032,0	287973
10	19,46	36032,0	701270
11	1018	35524,0	3,62E+07
12	24,13	35524,0	857245
13	14,03	36032,0	505458
14	44,66	35524,0	1.586.000
15	23,53	35524,0	835.773
16	28,68	35524,0	1.019.000
17	491,4	35524,0	17.460.000
18	13,92	35524,0	494650
19	276,9	35524,0	9,84E+06
20	23,33	35524,0	828873
21	24,03	34730,0	834534
22	1,034	35524,0	36.723
23	749,3	0,0	0
24	771,9	12790,0	9,87E+06
25	27,01	48157,0	1,30E+06
26	37,28	61448,0	2,29E+06
27	44,08	57395,0	2,53E+06
28	55	60731,0	3,34E+06
29	76	62876,0	4,78E+06
30	4,549	35524,0	161.599
31	5,552	35524,0	197.214
32	6,708	35524,0	238.281
33	6,824	35044,0	239123
34	17,21	35524,0	611386
35	100,6	58605,0	5,90E+06
36	4008	11361,0	4,55E+07
37	0	0,0	0
38	935,3	6041,0	5,65E+06
39	79,07	36032,0	2,85E+06

Her bir ekipman için giren ekserji akımlarının ortalama birim yakıt çevresel etki ($b_{P,k}$), çıkan ekserji akımlarının ortalama birim ürün çevresel etki ($b_{F,k}$), Denklem 2.129 ve 2.130 ile hesaplanmıştır. Ortalama birim ürün çevresel etki ile ortalama birim yakıt çevresel etki arasındaki izafi fark Çizelge 3.5’de gösterildiği gibi kondenserde (C) %1128 ve alçak basınç ısıtıcılarında sırasıyla (LPH1, LPH2, LPH3, LPH4) %340, %171, %108,9 ve %92,81 olmaktadır. En düşük ise dearatörde (D) %6,61 olarak gerçekleşmektedir.

Yatırımın çevresel etkileri ile ekserji yıkımının çevresel etkilerini karşılaştıran eksergoçevresel faktör ($f_{e,k}$) Denklem 2.131 ile hesaplanmıştır. Buna göre en yüksek eksergoçevresel faktör Çizelge 3.6 de gösterildiği üzere, en yüksek ile yüksek basınç ısıtıcısında (HPH1) %2,97 ve en düşük ise kondenserde (C) %0,001352 olarak gerçekleşmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Bursa Orhaneli ilçesinde kurulu olan 210 MW kapasiteli pülverize kömür yakıtlı Orhaneli Termik Santrali'nin eksergoekonomik ve eksergoçevresel analizi gerçekleştirilmiştir. Enerji ve ekserji analizi yapılırken, kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edilmiştir. Ekserji analizinde fiziksel ve kimyasal ekserjiler göz önünde bulundurularak analiz gerçekleştirilmiştir. Ekserji analizinde, yakıt ve ürün kuralı (F P kuralı) uygulanarak sistemdeki her bir bileşen ekserjetik açıdan değerlendirilmiştir.

Enerji üreten elektrik üretim sistemlerinde, her noktanın birim ürün maliyetini hesaplamak oldukça önemlidir. Sistemde kojenerasyon, trijenerasyon gibi çoklu üretim mevcut ise her bir ürünün maliyetini hesaplamak zordur. Her bir ürünün gerçek maliyetleri ekserjiye dayalı eksergoekonomik analiz ile hesaplanmaktadır. Aynı şekilde her bir ürünün çevreye etkileri ekserjiye dayalı eksergoçevresel analiz ile belirlenmektedir.

Sistemde en yüksek ekserji verimine sahip ekipman %92,4 ile orta basınç türbini (IPT), en düşük ekserji verimli ekipman ise %8,89 ile kondenserdir. Ekserji yıkımı 512,321 MW ile kazanda (B), en az ise 6,032 kW ile pompada (P2) gerçekleşmiştir.

Eksergoekonomik analiz için SPECO metodu seçilmiş ve termik santraldeki her noktadaki birim ürün maliyetleri hesaplanmıştır. Bu analiz sonucuna göre elektrik üretim maliyeti yüksek, orta, ve alçak basınç türbinlerinden sırasıyla 31,48; 28,47 ve 31,24 \$/GJ olarak hesaplanmıştır. Sistemde birim ekserji maliyeti en yüksek olan nokta 43,81 \$/GJ ile pompa (P1) giriş hattında gerçekleşmiştir.

Beşikten mezara mantığıyla, sistemde kullanılan her bileşenin hammadde olarak başlayıp üretim, kullanım ve bertaraf edilme süreleri boyunca çevreye verdikleri zarar yaşam döngüsü analizi (LCA) ile tespit edilmiştir. Eksergoekonomik analizdeki gibi LCA sonuçlarını ekserji ile ilişkilendirip eksergoçevresel analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucuna göre elektrik üretiminin birim çevreye etkileri yüksek, orta, ve alçak basınç türbinlerinden sırasıyla 41.686, 38.443 ve 40.877 (mPts/GJ) olarak hesaplanmıştır.

Gelecekteki çalışmalar için, bu sistemde, birim ekserjetik maliyeti ve birim çevresel etkiyi minimize etmek için eksergoekonomik ve eksergoçevresel optimizasyon yapılarak sistemin optimum çalışma koşulları belirlenmelidir.



KAYNAKLAR

- [1] Hepbaşı, A., Erbay, Z., İcier, F., Çolak, N., & Hancıoğlu, E. (t.y). Güneş Enerjisi Destekli Gaz Motoru Tahrikli Bir Isı Pompası Sistemi Uygulaması, *Mühendis ve Makine*, 49 (581), 20-29
- [2] **International Energy Agency.** (2019). World energy balances: Overview, Erişim: 10 Mayıs 2019, <https://webstore.iea.org/world-energy-balances-2018>
- [3] **Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.** (2019). Erişim: 10 Mayıs 2019, <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik>
- [4] **Dincer, I.** (2002). The role of exergy in energy policy making. *Energy policy*, 30 (2), 137-149. doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00079-9.
- [5] **Çengel, Y. A. & Boles, M. A.,** (2015). *An Engineering Approach Thermodynamics*, New York, McGrawHill Education.
- [6] **Rosen, M. A., & Dincer, I.** (2003). Exergy–cost–energy–mass analysis of thermal systems and processes. *Energy Conversion and Management*, 44 (10), 1633-1651. doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00179-6.
- [7] **Dincer, I., & Rosen, M. A.** (2012). *Exergy: energy, environment and sustainable development*. Oxford, UK,: Elsevier.
- [8] **Meyer, L., Tsatsaronis, G., Buchgeister, J., & Schebek, L.** (2009). Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems. *Energy*, 34 (1), 75-89. doi.org/10.1016/j.energy.2008.07.018.
- [9] **Erdem, H. H., Akkaya, A.V., Cetin, B., Dagdas, A., Sevilgen, S. H., Sahin, B., Teke, I., Gungor, C. Atas, S.** (2009) Comparative energetic and exergetic performance analyses for coal fired thermal power plants in Turkey. *International Journal of Thermal Sciences*, 48 (11), 2179-2186. doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.03.007.
- [10] **Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M., & Moran, M. J.,** (1996). *Thermal Design and Optimization*. Canada,: John Wiley & Sons.
- [11] **Topal, H., Taner, T., Naqvi, S. A. H., Altınsoy, Y., Amirabedin, E., & Ozkaymak, M.** (2017). Exergy analysis of a circulating fluidized bed power plant co-firing with olive pits: A case study of power plant in Turkey. *Energy*, 140, 40-46. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.042>.
- [12] **Ozdemir, K., Hepbasli, A., & Eskin, N.** (2010). Exergoeconomic analysis of a fluidized-bed coal combustor (FBCC) steam power plant. *Applied Thermal Engineering*, 30 (13), 1621-1631. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.03.020.
- [13] **Uysal, C., Kurt, H., & Kwak, H. Y.** (2017). Exergetic and thermoeconomic analyses of a coal-fired power plant. *International Journal of Thermal Sciences*, 117, 106-120. doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.010.

- [14] Ameri, M., Ahmadi, P., & Hamidi, A. (2009). Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a steam power plant: A case study. *International Journal of Energy Research*, 33 (5), 499-512. doi.org/10.1002/er.1495.
- [15] Xiong, J., Zhao, H., Zhang, C., Zheng, C., & Luh, P. B. (2012). Thermo-economic operation optimization of a coal-fired power plant. *Energy*, 42 (1), 486-496. doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.020.
- [16] Restrepo, Á., Miyake, R., Kleveston, F., & Bazzo, E. (2012). Exergetic and environmental analysis of a pulverized coal power plant. *Energy*, 45 (1), 195-202. doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.080.
- [17] Restrepo, Á., & Bazzo, E. (2016). Co-firing: An exergoenvironmental analysis applied to power plants modified for burning coal and rice straw. *Renewable Energy*, 91, 107-119. doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.048.
- [18] Ahmadi, P., & Dincer, I. (2011). Thermodynamic and exergoenvironmental analyses and multi-objective optimization of a gas turbine power plant. *Applied Thermal Engineering*, 31 (14-15), 2529-2540. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.04.018.
- [19] **Introduction to Statistical Mechanics.** (2011). Erişim: 10 Mayıs 2019, http://micro.stanford.edu/~caiwei/me334/Chap6_Thermodynamics_v04.pdf.
- [20] Masanes, L., & Oppenheim, J. (2017). A general derivation and quantification of the third law of thermodynamics. *Nature communications*, 8, 14538. doi: 10.1038/ncomms14538.
- [21] Tuncalı, E., Çiftçi, B., Yavuz, N., Toprak, S., Köker, A., Gencer, Z., Ayçık, H., Şahin, N. (2002). *Türkiye Tersiyer Kömürlerinin Kimyasal ve Teknolojik Özellikleri*, Maden Teknik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA), Ankara.
- [22] Gyul'maliev, A. M., & Shpirt, M. Y. (2008). Calculation of the enthalpy of formation of coal organic matter. *Solid Fuel Chemistry*, 42(5), 263-267. doi.org/10.3103/S0361521908050017
- [23] Cavalcanti, E. J. C. (2017). Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of an integrated solar combined cycle system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 507-519. doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.017.
- [24] Kotas, T. J. (1985). *The exergy method of thermal plant analysis*. Essex, Great Britain, Butterworths.
- [25] Gaggioli, R. A., & Wepfer, W. J. (1980). Exergy economics: I. Cost accounting applications. *Energy*, 5 (8-9), 823-837. doi.org/10.1016/0360-5442(80)90099-7.
- [26] Frangopoulos, C. A. (1983). *Thermoeconomic Functional Analysis: A method for optimal design or improvement of complex thermal systems*. (Doktora Tezi) Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- [27] Tsatsaronis, G., & Winhold, M. (1985). Exergoeconomic analysis and evaluation of energy-conversion plants—I. A new general methodology. *Energy*, 10 (1), 69-80. doi.org/10.1016/0360-5442(85)90020-9.
- [28] Valero, A., Lozano, M. A., & Munoz, M. (1986). A general theory of exergy savings. *ASME Book*

- [29] **Von Spakovsky, M. R., & Evans, R. B.** (1993). Engineering functional analysis—Part I. *Journal of Energy Resources Technology*, 115 (2), 86-92. doi:10.1115/1.2905985.
- [30] **Valero, A., Torres, C., & Serra, L.** (1992). A general theory of thermoeconomics: Part I: Structural analysis. In *International Symposium ECOS* (ss. 137-145).
- [31] **Kwak, H. Y., Kim, D. J., & Jeon, J. S.** (2003). Exergetic and thermoeconomic analyses of power plants. *Energy*, 28 (4), 343-360. doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00138-X.
- [32] **Lazzaretto, A., & Tsatsaronis, G.** (1999). On the calculation of efficiencies and costs in thermal systems. In *Proceedings of the ASME advanced energy systems division* (ss. 421-430). New York: American Society of Mechanical Engineers.
- [33] **Lazzaretto, A., & Tsatsaronis, G.** (2006). SPECO: a systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*, 31 (8-9), 1257-1289. doi.org/10.1016/j.energy.2005.03.011.
- [34] **Xiong, J., Zhao, H., Zhang, C., Zheng, C., & Luh, P. B.** (2012). Thermoeconomic operation optimization of a coal-fired power plant. *Energy*, 42 (1), 486-496. doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.020.
- [35] **International Organization for Standardization** (2006). Environmental management life cycle assessment. European Standard ENISO14040 and 14044. Geneva, Switzerland: ISO.
- [36] **Ozbilen, A., Dincer, I., & Rosen, M. A.** (2011). Environmental evaluation of hydrogen production via thermochemical water splitting using the Cu-Cl cycle: a parametric study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (16), 9514-9528. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.05.067.
- [37] **Pre Sustainability.** (2019). Erişim: 10 Mayıs 2019, <https://www.pre-sustainability.com>
- [38] **Boyano, A., Blanco-Marigorta, A. M., Morosuk, T., & Tsatsaronis, G.** (2011). Exergoenvironmental analysis of a steam methane reforming process for hydrogen production. *Energy*, 36 (4), 2202-2214. doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.020.
- [39] **Petrakopoulou, F.** (2011). *Comparative evaluation of power plants with CO2 capture: thermodynamic, economic and environmental performance.* (Doktora Tezi) Berlin Teknik Üniversitesi, Berlin.
- [40] **Yürüsoy, M., & Keçebaş, A.** (2017). Advanced exergo-environmental analyses and assessments of a real district heating system with geothermal energy. *Applied Thermal Engineering*, 113, 449-459. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.054.
- [41] **Eco-indicator 99 Manual for Designers: A damage oriented for Life Cycle Impact Assessment.** (2000). Erişim: 10 Mayıs 2019, https://www.pre-sustainability.com/download/EI99_Manual.pdf
- [42] **Chase, M. W.** (1996). NIST-JANAF thermochemical tables for oxygen fluorides. *Journal of physical and chemical reference data*, 25(2), 551-603.

- [43] **Zhu, Y., Zhai, R., Peng, H., & Yang, Y.** (2016). Exergy destruction analysis of solar tower aided coal-fired power generation system using exergy and advanced exergetic methods. *Applied Thermal Engineering*, 108, 339-346.
- [44] Rocha, D. H., & Silva, R. J. (2019). Exergoenvironmental analysis of a ultra-supercritical coal-fired power plant. *Journal of Cleaner Production*, 231, 671-682.
- [45] **Bolatturk, A., Coskun, A., & Geredelioglu, C.** (2015). Thermodynamic and exergoeconomic analysis of Çayırhan thermal power plant. *Energy conversion and management*, 101, 371-378.
- [46] **Adibhatla, S., & Kaushik, S. C.** (2014). Energy and exergy analysis of a super critical thermal power plant at various load conditions under constant and pure sliding pressure operation. *Applied thermal engineering*, 73(1), 51-65.
- [47] **Gungor, A., Erbay, Z., & Hepbasli, A.** (2012). Exergoeconomic (thermoeconomic) analysis and performance assessment of a gas engine–driven heat pump drying system based on experimental data. *Drying technology*, 30 (1), 52-62. doi.org/10.1080/07373937.2011.618897.
- [48] **Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu.** (2019). Erişim: 10 Mayıs 2019, <http://www.tki.gov.tr/bilgi/komur/komur-fiyatlari/236>
- [49] **Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası.** (2019). Erişim: 10 Mayıs 2019, <https://www.tcmb.gov.tr/>
- [50] **Elektrik Piyasası Denetleme Kurumu.** (2019). Erişim: 10 Mayıs 2019, <https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>
- [51] **Carvalho, M., Serra, L. M., & Lozano, M. A.** (2011). Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints. *Energy*, 36(6), 3779-3790. doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.023.
- [52] **Szargut, J., Morris, D. R., & Steward, F. R.** (1987). *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*. New York, Hemisphere Pub.
- [53] **Ozdemir, K., Hepbasli, A., & Eskin, N.** (2010). Exergoeconomic analysis of a fluidized-bed coal combustor (FBCC) steam power plant. *Applied Thermal Engineering*, 30 (13), 1621-1631. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.03.020.
- [54] **Ahmadi, P., & Dincer, I.** (2010). Exergoenvironmental analysis and optimization of a cogeneration plant system using Multimodal Genetic Algorithm (MGA). *Energy*, 35 (12), 5161-5172. doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.050.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad :Abdullah DÜZCAN
Doğum Tarihi ve Yeri :1991 / BURSA
E-posta :bdllhdzcn@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :2016, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü