

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KOMBİNE ÇEVİRİM SANTRALLERİNDE ISI
MALİYETİNİN BELİRLENMESİ**

Makina Mühendisi Süleyman ERSOY

**F.B.E Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Süleyman Hakan SEVİLGİN

İSTANBUL, 2010

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KOMBİNE ÇEVİRİM SANTRALLERİNDE ISI
MALİYETİNİN BELİRLENMESİ**

Makina Mühendisi Süleyman ERSOY

**F.B.E Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Süleyman Hakan SEVİLGİN

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KOJENERASYON TANIMI	3
2.1 Kojenerasyonun Önemli Teknik Parametreleri	7
2.1.1 Isı Güç Oranı	7
2.1.2 Isı Enerjisinin Kalitesi	7
2.1.3 Yakıtların Kullanılabilirliği	8
2.1.4 Sistemin Güvenilirliği	8
2.1.5 Elektrik Alımı ve Satımı	8
2.1.6 Bölgesel Çevre Kuralları	9
2.2 Kojenerasyonun Ekonomik Analizinde Anahtar Parametreler	9
2.2.1 İlk Yatırım	9
2.2.2 İşletme ve Bakım Maliyeti	9
2.2.3 Yakıt Maliyeti	10
2.2.4 Satılan ve Satın Alınan Enerji Maliyeti	10
3. EKSERJİ KAVRAMI	11
4. EKSERJİ ANALİZİ	14
4.1 Ekserji Bileşenleri	15
4.2 Ekserji Denkliği	20
4.3 Performans Kriterleri	22
4.3.1 Rasyonel Verim	23
4.3.2 Tersinmezlik Oranı	23
4.3.3 Geliştirme Potansiyeli	24
5. EKSERJİ EKONOMİK ANALİZ	25
5.1 Maliyet Denge Denklemi	25

5.2	Ekserjoekonomik Denge Denklemi	26
6.	KOJENERASYON TESİSİNİN TANITIMI, EKSERJİ, EKONOMİ VE EKSERJOEKONOMİ ANALİZLERİ	28
6.1	Temel Operasyon Karakteristiği	30
6.2	Tesis Oluşturan Sistemler	31
6.2.1	Gaz Türbini	31
6.2.2	Buhar Türbini	32
6.2.3	Isı Geri Kazanımlı Buhar Jeneratörü	33
6.2.4	Soğutma Kulesi	34
6.2.5	Gaz Kompresörü	34
6.3	Tesisin Ekserji Analizi	35
6.3.1	Kompresör Ekserji Analizi	37
6.3.2	Yanma Odası Ekserji Analizi	38
6.3.3	Gaz Türbini Ekserji Analizi	39
6.3.4	Isı Geri Kazanımlı Buhar Üretici (HRSG) Ekserji Analizi	41
6.3.5	Buhar Türbini Ekserji Analizi	41
6.3.6	Gaz Kompresörü Ekserji Analizi	43
6.3.7	Soğutma Kulesi Ekserji Analizi	45
6.3.8	Dearatör Ekserji Analizi	46
6.3.9	Ana Kondenser Ekserji Analizi	47
6.3.10	Bölgesel Isıtma Kondenseri Ekserji Analizi	48
6.3.11	Pompaların Ekserji Analizi	50
6.3.11.1	Yüksek Basınç Besleme Suyu Pompası Ekserji Analizi	50
6.3.11.2	Alçak Basınç Besleme Suyu Pompası Ekserji Analizi	51
6.3.11.3	Ana Kondens Suyu Pompası Ekserji Analizi	52
6.3.11.4	Bölgesel Isıtma Kondens Suyu Pompası Ekserji Analizi	53
6.3.11.5	Ana Soğutma Suyu Pompası Ekserji Analizi	55
6.3.12	Tesisin Genel Ekserji Verimi	56
6.4	Tesisin Ekonomik Analizi	57
6.5	Tesisin Ekserjoekonomik Analizi	68
6.5.1	Kompresör Maliyet Analizi	69
6.5.2	Yanma Odası Maliyet Analizi	70
6.5.3	Gaz Türbini Maliyet Analizi	70
6.5.4	Isı Geri Kazanımlı Buhar Üretici (HRSG) Maliyet Analizi	71
6.5.5	Buhar Türbini Maliyet Analizi	72
6.5.6	Gaz Kompresörü Maliyet Analizi	72
6.5.7	Soğutma Kulesi Maliyet Analizi	73
6.5.8	Dearatör Maliyet Analizi	74
6.5.9	Ana Kondenser Maliyet Analizi	74
6.5.10	Bölgesel Isıtma Kondenseri Maliyet Analizi	75
6.5.11	Pompaların Maliyet Analizi	76
6.5.11.1	Yüksek Basınç Besleme Suyu Pompası Maliyet Analizi	76
6.5.11.2	Alçak Basınç Besleme Suyu Pompası Maliyet Analizi	76
6.5.11.3	Ana Kondens Suyu Pompası Maliyet Analizi	77
6.5.11.4	Bölgesel Isıtma Kondens Suyu Pompası Maliyet Analizi	77
6.5.11.5	Ana Soğutma Suyu Pompası Maliyet Analizi	78
7.	SONUÇ	81

KAYNAKLAR.....	86
EKLER	89
EK1 Kombine Çevrim Kojenerasyon Tesisinin Plan Çizimi.....	89
EK2 Ekserjoekonomik Analiz Bağlıntılarının EES Programında Yazılımı	90
ÖZGEÇMİŞ.....	94

SİMGE LİSTESİ

c	Birim Ekserji Maliyeti
c_{el}	Birim Ekserji Başına Elektrik Birim Maliyeti
c_{th}	Birim Ekserji Başına Isı Birim Maliyeti
Ξ	Ekserji
Ξ_f	Fiziksel Ekserji
Ξ_p	Potansiyel Ekserji
Ξ_k	Kinetik Ekserji
Ξ_{km}	Kimyasal Ekserji
Ξ_T	Ekserji Bozunumu
$'E_{GT}$	Gaz Türbininde Üretilen Elektrik Enerjisi
$'E_{BT}$	Gaz Türbininde Üretilen Elektrik Enerjisi
g_e	Elektrik Birim Maliyeti
g_{th}	Isı Birim Maliyeti
G	Gibbs Serbest Enerjisi
H	Entalpi
I	Yatırım Maliyeti
J	Jeneratör
K	Bir Elemana Ait Belirli Bir Değere Getirilmiş Satın Alma Maliyeti
K_k	Kompresörün Belirli Bir Değere Getirilmiş Satın Alma Maliyeti
K_y	Yanma Odasının Belirli Bir Değere Getirilmiş Satın Alma Maliyeti
K_T	Gaz Türbinin Belirli Bir Değere Getirilmiş Satın Alma Maliyeti
K_a	Isı Geri Kazanımlı Buhar Üreticisinin Belirli Bir Değere Getirilmiş Satın Alma Maliyeti
K_{BT}	Buhar Türbininin Belirli Bir Değere Getirilmiş Satın Alma Maliyeti
K_{gk}	Gaz Kompresörünün Belirli Bir Değere Getirilmiş Satın Alma Maliyeti
K_{ct}	Soğutma Kulesinin Belirli Bir Değere Getirilmiş Satın Alma Maliyeti
K_d	Deaeratörün Belirli Bir Değere Getirilmiş Satın Alma Maliyeti
K_{mc}	Ana Kondenserin Belirli Bir Değere Getirilmiş Satın Alma Maliyeti
K_{dh}	Bölgesel Isıtma Kondenserinin Belirli Bir Değere Getirilmiş Satın Alma Maliyeti
K_{hp}	Yüksek Basınç Pompasının Belirli Bir Değere Getirilmiş Satın Alma Maliyeti
K_{lp}	Alçak Basınç Pompasının Belirli Bir Değere Getirilmiş Satın Alma Maliyeti
K_{cp}	Ana Kondens Suyu Pompasının Belirli Bir Değere Getirilmiş Satın Alma Maliyeti
K_{dp}	Bölgesel Isıtma Kondens Suyu Pompasının Belirli Bir Değere Getirilmiş Satın

	Alma Maliyeti
K_{wp}	Soğutma Suyu Pompasının Belirli Bir Değere Getirilmiş Satın Alma Maliyeti
M	Maliyet
m	Kütleli Debi
OM	İşletme ve Bakım Maliyeti
P	Basınç
P_0	Çevre Sıcaklığı
Q	Isı
R	Üniversal Gaz Sabiti
S	Entropi
T	Sıcaklık
u	İç Enerji
v	Hız
V	Hacim
W	İş
W_{GT}	Gaz Türbininde Üretilen İş
W_{BT}	Buhar Türbininde Üretilen İş
W_{GK}	Gaz Kompresöründe Üretilen İş
W_{CT}	Soğutma Kulesinde Üretilen İş
W_{HP}	Yüksek Basınç Pompalarında Üretilen İş
W_{LP}	Alçak Basınç Pompalarında Üretilen İş
W_{CP}	Ana Kondens Suyu Pompalarında Üretilen İş
W_{DP}	Bölgesel Isıtma Kondens Suyu Pompalarında Üretilen İş
W_{WP}	Soğutma Suyu Pompllarında Üretilen İş
X	Mol Fraksiyonu
z	Yükseklik
η	Verim
ε	Ekserji Verimi

KISALTMA LİSTESİ

AFUDC	İnşaat Süresince Kullanılan Fonlar İçin Ödenek
BD	Karne Amortismanı
DTIX	Ertelenmiş Gelir Vergisi
EYO	Enerjiden Yararlanma Oranı
EIO	Elektrik Isı Oranı
FC	Yakıt Maliyeti
HRSG	Isı Geri Kazanımlı Buhar Üreticisi
IO	Isı Oranı
ITX	Gelir Vergisi
LVH	Alt Isıl Değer
MACRS	Güncel Hızlandırılmış Maliyet Geri Kazanım Sistemi
OMC	İşletme ve Bakım Maliyeti
OTXI	Diğer Vergi ve Sigortalar
RCEAF	Ortak Sermaye Ödeneği Geri Kazanımı
ROI_{ce}	Ortak Sermaye Yatırımının Minimum Getirisi
ROI_{ps}	İmtiyazlı Senet Yatırımının Minimum Getirisi
ROI_d	Borçlanarak Yatırımın Minimum Getirisi
SUC	Devreye Alma Maliyeti
TCR	Toplam Sermaye Geri Kazanımı
TDI	Toplam Amortisman Yatırımının
TL	Vergi Ömrü
TXD	Yıllık Vergi Amortismanı
TRR	Toplam Gelir Gereksinimi
WC	İşletme Sermayesi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Kombine çevrimli kojenerasyon sistemi (Ağabay, 1993a)	4
Şekil 2.2 (a) Konvansiyonel elektrik üretimi (b) kojenerasyon (Çengel ve Boles, 1998).....	4
Şekil 2.3 Doğal gazlı Kojenerasyon ve konvansiyonel elektrik üretimi ile Sankey diyagramı kullanarak karşılaştırılması (Koçak ve Gülşen, 1998)	5
Şekil 2.4 Tersinir ısı makinesi (Çengel ve Boles, 1998)	6
Şekil 3.1 Verilen durum ile çevre şartları arasında çalışan tersinir bir ısı makinası (Çomaklı vd, 2004)	12
Şekil 4.1 Ekserji bileşenleri (Szargut, 1988)	15
Şekil 4.2 Fiziksel ekserji tayini için tersinir bir modül (Kotas, 1998).....	16
Şekil 4.3 Verilen durum ile çevre arasındaki fiziksel ekserji farkı (Kotas, 1998)	17
Şekil 4.4 Verilen iki durum arasındaki fiziksel ekserji farkı (Kotas, 1998)	17
Şekil 4.5 Gazlar için ekserji diyagramı (Kotas, 1995)	18
Şekil 4.6 Sonlu sıcaklık farkı nedeniyle yer alan ısı aktarımı süresince ekserji aktarımı ve tahribi (Çengel ve Boles, 1998)	22
Şekil 6.1 Prosesin genel akış diyagramı	36
Şekil 6.2 Kompresör akım şeması	37
Şekil 6.3 Yanma odası akım şeması	38
Şekil 6.4 Gaz türbini akım şeması	40
Şekil 6.5 Isı geri kazanımlı buhar üreticisi akım şeması	41
Şekil 6.6 Buhar türbini akım şeması.....	43
Şekil 6.7 Gaz kompresörü akım şeması.....	44
Şekil 6.8 Soğutma kulesi akım şeması	45
Şekil 6.9 Dearatör akım şeması	46
Şekil 6.10 Ana kondenser akım şeması	47
Şekil 6.11 Bölgesel ısıtma kondenseri akım şeması.....	49
Şekil 6.12 Yüksek basınç besleme suyu pompası akım şeması	50
Şekil 6.13 Alçak basınç besleme suyu pompası akım şeması	51
Şekil 6.14 Ana kondens suyu pompası akım şeması	52
Şekil 6.15 Bölgesel ısıtma kondens suyu pompası akım şeması	54
Şekil 6.16 Ana soğutma suyu pompası akım şeması.....	55
Şekil 6.17 Kompresör maliyet akışı	69
Şekil 6.18 Yanma odası maliyet akışı	70
Şekil 6.19 Gaz türbini maliyet akışı	71

Şekil 6.20 Isı geri kazanımlı buhar üreticisi maliyet akışı	71
Şekil 6.21 Buhar türbini maliyet akışı	72
Şekil 6.22 Gaz kompresörünün maliyet akışı.....	73
Şekil 6.23 Soğutma kulesi maliyet akışı.....	73
Şekil 6.24 Dearatör maliyet akışı	74
Şekil 6.25 Ana kondenser maliyet akışı	75
Şekil 6.26 Bölgesel ısıtma kondenseri maliyet akışı	75
Şekil 6.27 Yüksek basınç besleme suyu pompası maliyet akışı.....	76
Şekil 6.28 Alçak basınç besleme suyu pompası maliyet akışı	76
Şekil 6.29 Ana kondens suyu pompası maliyet akışı	77
Şekil 6.30 Bölgesel ısıtma konden suyu pompası maliyet akışı.....	77
Şekil 6.31 Ana soğutma suyu pompası maliyet akışı	78
Şekil 7.1 Tesisdeki birimlerin ekserji verimleri	81
Şekil 7.2 Tesise ait genel verim ifadeleri	81
Şekil 7.3 Tesisdeki birimlerin ekserji bozunumları.....	82
Şekil 7.4 Maliyet analizi birim fiyatlarına göre tesisin para akışı	83
Şekil 7.5 Ekserjoekonomi analizi birim fiyatlarına göre tesisin para akışı	83
Şekil 7.6 Optimize edilen maliyet analizi birim fiyatlarına göre tesisin para akışı.....	84
Şekil 7.7 Optimize edilen ekserjoekonomi analizi birim fiyatlarına göre tesisin para akışı	85

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Kojenerasyon sistemlerinin ısı güç oranları ve verimleri (Mohanty, 2001).....	8
Çizelge 3.1 Enerji ve ekserjinin karşılaştırılması (Dinçer, 2000).....	13
Çizelge 4.1 Bazı maddelerin standart kimyasal ekserjileri (Bejan, 1996).....	19
Çizelge 6.1 Belirli koşullardaki operasyon parametreleri	30
Çizelge 6.2 Prosesteki akımların özellikleri	35
Çizelge 6.3 Kompresör için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri	38
Çizelge 6.4 Yanma odası için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri	39
Çizelge 6.5 Gaz türbini için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri	40
Çizelge 6.6 Isı geri kazanımlı buhar üreticisi için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri	42
Çizelge 6.7 Buhar türbini için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri.....	43
Çizelge 6.8 Gaz kompresörü için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri.....	44
Çizelge 6.9 Soğutma kulesi için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri	45
Çizelge 6.10 Dearatör için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri	47
Çizelge 6.11 Ana kondenser için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri	48
Çizelge 6.12 Soğutma kullesi için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri	49
Çizelge 6.13 Yüksek basınç besleme suyu pompası kütle, enerji ve ekserji denklilikleri	51
Çizelge 6.14 Alçak basınç besleme suyu pompası için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri	52
Çizelge 6.15 Ana kondens suyu pompası için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri	53
Çizelge 6.16 Bölgesel ısıtma kondens suyu pompası için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri	54
Çizelge 6.17 Ana soğutma suyu pompası için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri	55
Çizelge 6.18 Tesisin genel kütle, enerji ve ekserji denklilikleri	57
Çizelge 6.19 Tesise ait toplam yatırım maliyeti (bütün maliyetler “€” olarak verilmiştir.).....	58
Çizelge 6.20 Toplam gelir gereksinimi hesaplamasında kullanılacak parametreler ve tahminler	59
Çizelge 6.21 İnşaat sırasında kullanılan fonlar için ödenek hesaplaması ($\times 10^3$ Avro)	61
Çizelge 6.22 Net sermaye yatırım toplamı	62
Çizelge 6.23 Yıllık vergi amortisman miktarı ve yıl sonu vergi karne değeri	63
Çizelge 6.24 Tesisin yıldan yıla gelir gereksinimi analizi ($\times 10^3$ Avro)	64
Çizelge 6.25 Tesisin yıldan yıla toplam sermaye geri kazanımı analizi	65
Çizelge 6.26 Yıldan yıla sermaye geri kazanımının dağılımı ($\times 10^3$ €)	66
Çizelge 6.27 20 yıllık tesis ömrü için belirli bir değere getirilmiş maliyet tablosu	67
Çizelge 6.28 20 yıllık tesis ömrü için gelir gider bilgileri ve geri ödeme süresi.....	68
Çizelge 6.29 Ekserji değerleri ve birim ekserji başına bir değere getirilmiş maliyet tablosu ..	79

Çizelge 6.30 20 yıllık tesis ömrü için gelir gider bilgileri ve geri ödeme süresi.....	80
Çizelge 7.1 Maliyet ve ekserjoekonomik analiz sonucunda bulunan birim maliyetler.....	84

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması boyunca bilgi ve yardımlarını esirgemeyen değerli tez hocam Yrd. Doç. Dr. Süleyman Hakan SEVİLGİN'e, çalışmalarım süresince emekleri geçen diğer hocalarıma, varlıklarıyla bana her zaman destek olan tüm arkadaşlarıma, tüm bu çalışma süresince maddi manevi bana güç ve moral veren sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Enerji tesisi yatırımlarının karlılığı için maliyet analizi ve ürünlerin birim maliyetleri önemlidir. Elektrik üretiminin yanı sıra bölgesel ısıtmada kullanılacak sıcak suyun da üretildiği kombine çevrim kojenerasyon santrallerinde bu iki ürünün birim maliyetlerinin hesaplanması sistem seçimi ve karlılık açısından değerlendirme yapabilmeye olanak vermektedir.

Bu tez çalışmasında kojenerasyon kavramı, ekserji kavramı, ekserji analizi ve ekserjoekonomi analizi anlatılmış olup kurulmakta olan 220 MW_e ve 160 MW_{th} güce sahip bir kombine çevrim kojenerasyon santralinin kısaca tanıtımı yapılmıştır. Daha sonra bu tesise ait ekserji, ekonomi ve ekserjoekonomi analizleri yapılmış olup birim maliyetler hem belirli bir değere getirilmiş maliyet analizi yöntemiyle hem de ekserjoekonomik analiz yöntemiyle hesaplanmıştır. Isı maliyeti buhar türbininden çekilen ara buharın türbinde meydana getirdiği güç kaybı farkı göz önüne alınarak bulunmuştur.

Yapılan bu hesaplarda çıkan sonuçların fizibilite çalışması sırasında alınan değerlerle karşılaştırılması sonuç bölümünde verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ekserji analizi, ekserjoekonomik analiz, maliyet analizi, birim maliyet analizi

ABSTRACT

Cost analysis and unit cost of products are important for selecting system and profitability of a power plant investment. The calculation of unit cost of electricity and hot water used in district heating produced in combined cycle cogeneration systems make possible to estimate regarding to profitability and selecting system.

This study presents cogeneration concept, exergy concept, exergy analysis and exergoeconomic analysis. Also it gives brief information about 220 MW_e and 160 MW_{th} combined cycle cogeneration system which has been constructed in Skopje. Then, exergy, economy and exergoeconomy analysis have been done and unit cost calculation has been done regarding to both levelized cost calculation and exergoeconomy analysis. The cost of heat production has been calculated considering the lost power in the steam turbine caused by steam extraction and as a function of the cost of unit electricity.

The results have been compared with the values estimated for feasibility study and presented in the conclusion section.

Key Words: Exergy analysis, exergoeconomy analysis, cost analysis, unit cost analysis

1. GİRİŞ

Dünyada fosil kaynaklı yakıt rezervlerinin azalması, sanayileşme ile birlikte önemli çevre problemlerinin ortaya çıkmış olması ve enerji ihtiyacının sürekli artması gibi nedenlerle birincil yakıt kaynaklarından mümkün olan en yüksek oranda yararlanmaya yönelik çalışmalar önem kazanmıştır. Bu çalışmalardan birisi mekanik ve ısı enerji ihtiyaçlarının aynı tesis içerisinde birlikte karşılanmasını sağlayan kojenerasyon sistemleridir. Bileşik ısı güç üretimi olarak da tanımlanan kojenerasyon, mekanik enerji eldesinden sonra atık gazların atık ısı kazanlarında değerlendirilmesiyle aynı tesis içerisinde ısı enerjisi ihtiyaçlarının da karşılanmasına olanak vermektedir.

Kojenerasyon, 1970'li yılların sonlarına doğru güncel ve ilgi çekici bir duruma gelmiştir. Kojenerasyonun güncel olma nedeni üç faktöre dayanmaktadır. O günlerde yaşanan yakıt krizinin enerji fiyatlarına ve kullanımına etki etmesi, küçük çaptaki kojenerasyon tesislerinin birim enerji fiyatının düşük olması ve kojenerasyon tesislerinin sıradan elektrik üreten tesislerle rekabete girmesi kojenerasyonu güncel hale getirmiştir (Mohanty, 2001).

Enerjinin etkin kullanımı ve sistemlerdeki verim artışı, enerji üretimi ile tüketiminin maksimum verimle gerçekleştirilmesi ve enerji kayıplarının minimuma indirilmesini, yani enerji tasarrufunu sağlayarak enerji talebini kontrol altına alır. Yüksek enerji verimliliği sayesinde, belli miktardaki enerji ile daha fazla ürün elde edilebilir veya belli miktarda ürün için daha az enerji tüketilebilir. Özellikle büyük tesislerde enerjinin verimli kullanılması ile, enerji maliyeti düşürülebileceği gibi, atık enerjinin geri kazanılması için kurulacak sistemlerin maliyeti de en aza indirilebilir. Ayrıca, fosil yakıtların kullanıldığı tesislerde enerji dönüşümü sırasında çevreye atılan zararlı emisyonlar da azaltılabilir. (Büyüktür, 1986)

Bir enerji kaynağının enerji miktarını bilmek, sistemi kurmak için yeterli bilgi değildir; asıl bilinmesi gereken, enerji kaynağının iş yapma potansiyeli yani kullanılabilir enerji miktarıdır. (Çengel ve Boles, 1994)

Klasik güç santrallerinde fosil esaslı yakıt enerjisinin yaklaşık üçte biri elektrik enerjisine dönüştürülebilmekte ve üçte ikisi ise çevreye atılmaktadır. Buna karşılık bir kojenerasyon sisteminde elektrik üretimi sırasında ortaya çıkan atık ısı, eşanjörler yardımı ile çeşitli ısı ihtiyaçları için (sıcak su, buhar, absorpsiyonlu soğutma v.b.) değerlendirilebilmektedir. Gazla çalışan kojenerasyon sistemlerinde elektrik ve ısı eş zamanlı olarak üretilmesi ile %80-90 oranında verim elde edilebilmektedir. Böylece primer enerjinin atık kısmı minimum düzeyde

tutulmaktadır. Bu yüksek sistem verimi sayesinde kojenerasyon sistemi, ilk yatırım tesis giderini 1.5-6 sene gibi kısa bir sürede geri ödemektedir (Sucuoğlu, 1999).

Bu çalışma, kojenerasyonun tanımı, ekserji ve ekserjoekonomi kavramları, ekserji analizi, maliyet analizi, 220 MW'lık elektrik çıktısı ile 160 MW'lık ısı enerjisi çıktısı olan bir kombine çevrim kojenerasyon tesisinin tanıtımı, tesise ait ekserji, maliyet ve eksejoekonomi analiz çalışmaları ile sonuç bölümlerinden oluşmaktadır. Tezin sonucunda bir kombine çevrim kojenerasyon tesisinde ısı maliyetinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. KOJENERASYON TANIMI

Kojenerasyon kısaca, enerjinin hem elektrik hem de ısı biçimlerinde aynı sistemde beraberce üretilmesi olarak tarif edilir. Elektrik üretimi sırasında açığa çıkan atık ısıdan yararlanıldığından, iki enerjinin ortak üretimi sırasında, tek tek kendi başlarına ayrı yerlerde üretilmesinden daha ekonomik sonuçlar alınır (Khan ve Rasul, 2004).

Kojenerasyonun amacı, elektrik üretiminde atık gaz enerjisini, sanayi veya konutların ihtiyacı doğrultusunda kullanılmasına imkan vererek, toplam verimin yükseltilmesini sağlamaktır.

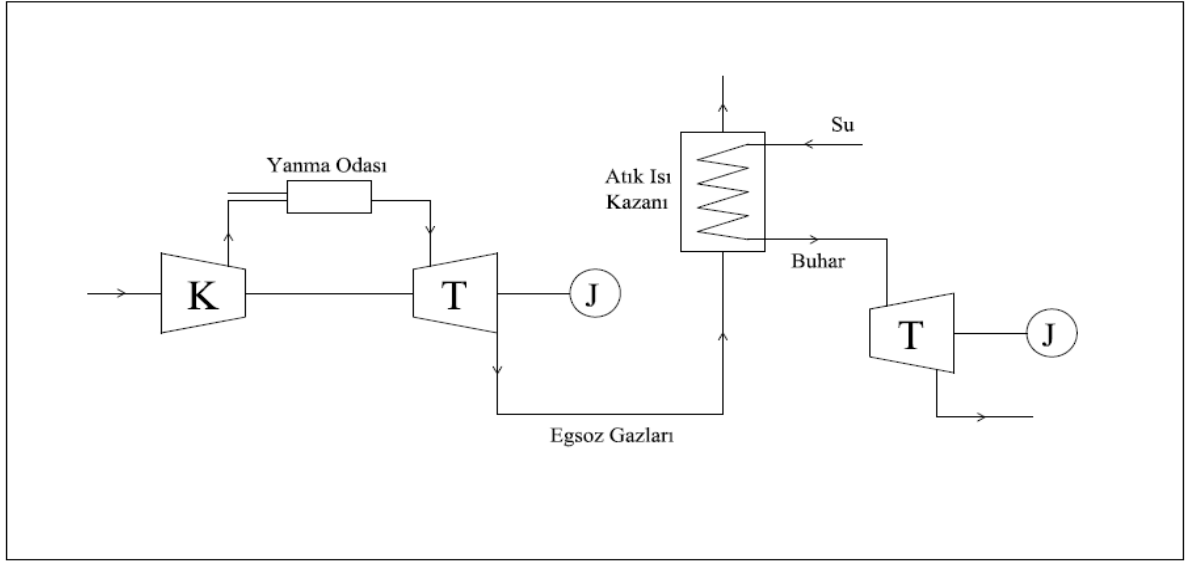
İlk basit uygulamaları 20. yüzyılın ilk yarısında görülen bu teknoloji ucuz yakıt döneminde terk edilmiş, 1973-1979 petrol krizlerinin ardından geliştirilerek yeniden gündeme gelmiştir (Chamber ve Potter, 2002).

Günümüzde, kojenerasyona olan ilginin tekrar artmasının birçok nedeni vardır. Bunların başında, elektrik ihtiyacının hızla artması, ek üretim kapasitesinin uluslararası otoriteler tarafından finanse edilmesi, çevre kirliliği ve emisyonun belli değerlere oturtulması gelmektedir. Tesislerini geliştirmeyi planlayan, yeni endüstriyel alanlarda gelişmek isteyen veya enerji kaynakları çok olan veya ürettiği gücü satmak isteyen endüstriyel tesislere, kojenerasyon sistemi önerilmektedir. (Mohanty, 2001)

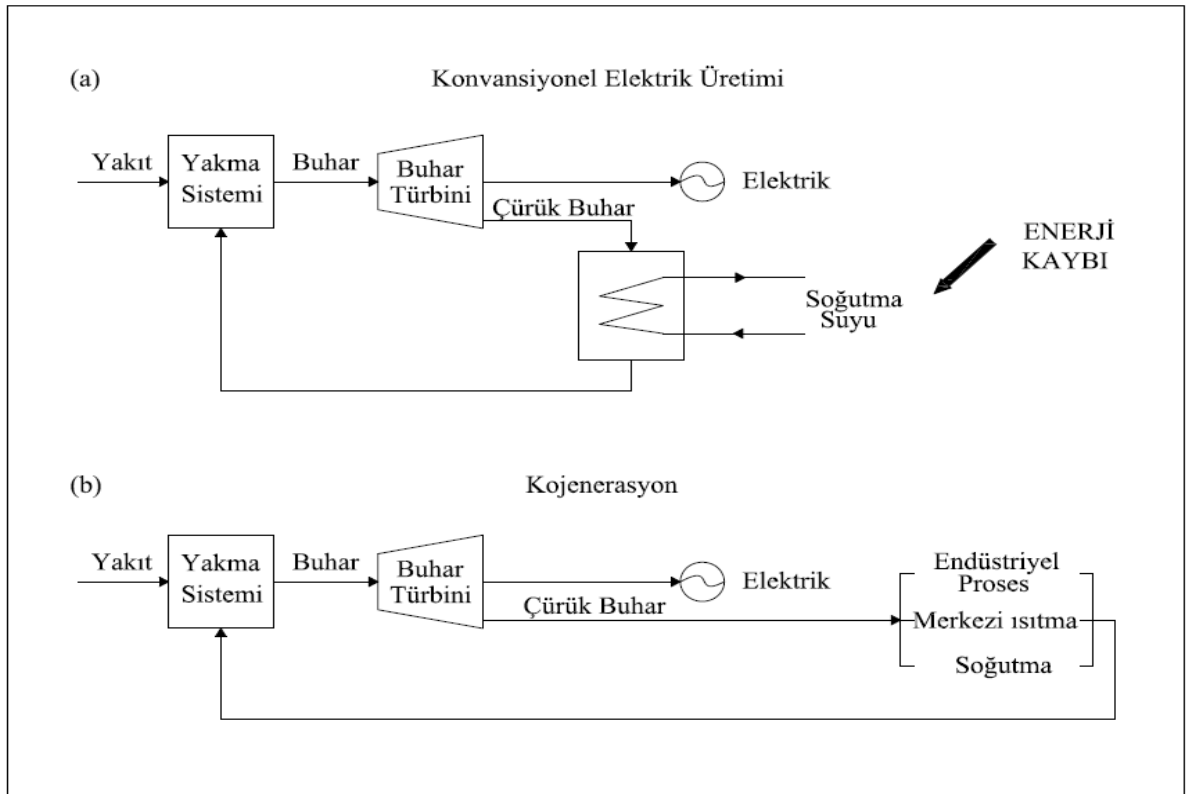
Kombine çevrim terimi, esas itibarıyla gaz türbin çevrimi ve buhar çevriminin bir sistem içine alınarak birbirini tamamlayıcı şekilde çalıştırılmasını ifade eder. Genel prensibi, gaz türbin çevriminden çıkan egzoz gazının yüksek enerjisi, Rankine çevriminde kullanılarak ek bir enerji üretiminin sağlanmasına dayanmaktadır. Kombine çevrimli sistem, ısı güç üretiminde günümüzde geçerli olan en verimli yöntem konumundadır. (Özgürel ve Egeli, 1994a)

Bir kombine çevrim santralinin prensip şeması ve bu kombine çevrim santralindeki enerji dağılımı Şekil 2.1’de görülmektedir.

Elektrik üreten bir gaz türbini kullandığı enerjinin sadece %30-40 kadarını elektriğe çevirebilir. Ancak, bu sistemin “bileşik ısı-güç sistemi” ya da kısaca kojenerasyon şeklinde proses ısıtma ya da soğutmada kullanılması halinde, dışarıya atılacak olan ısı enerjisinin büyük bir kısmı kullanılabilir enerjiye dönüştürülerek, toplam enerji girişinin %70-90’ının değerlendirilmesi sağlanabilir (Şekil 2.2) (Emho, 2003).



Şekil 2.1 Kombine çevrimli kojenerasyon sistemi (Ağabay, 1993a)

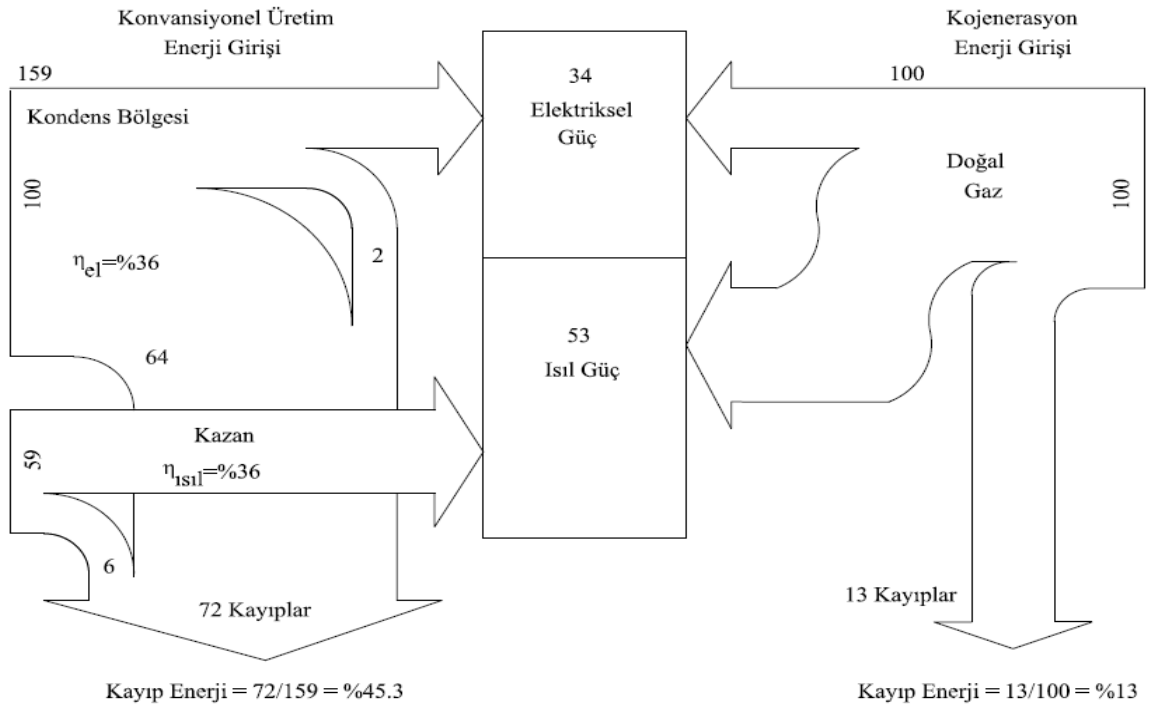


Şekil 2.2 (a) Konvansiyonel elektrik üretimi (b) kojenerasyon (Çengel ve Boles, 1998)

Her iki enerji biçiminin aynı miktarlarda ayrı ayrı üretilmesi için gerekli birincil enerji miktarının, bunların kojenerasyonla üretilmesi durumunda ne oranda azalacağı Şekil 2.3'de

gösterilmektedir.

Konvansiyonel sistem ve doğal gazlı kojenerasyon sistemi ile enerji üretimi arasındaki farkların Sankey diyagramı üzerindeki karşılaştırılmasından görüleceği üzere Şekil 2.3; 34 birim elektriksel güce, 53 birim ısıl güce sahip olan bir tesisin bu ihtiyaçlarını karşılamak için, konvansiyonel sistemde 159 birim enerji gerekirken, doğal gazlı kojenerasyon sisteminde 100 birim enerji yeterli olmaktadır.

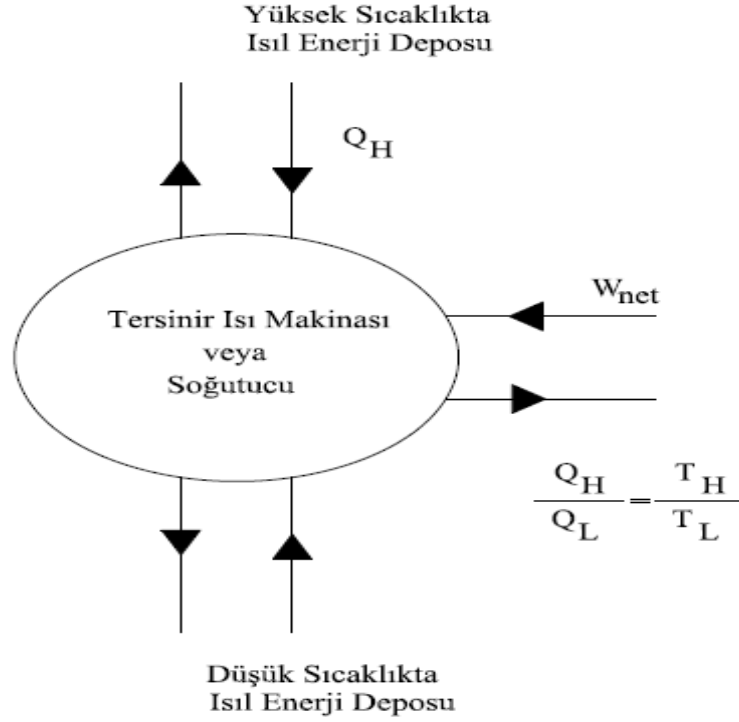


Şekil 2.3 Doğal gazlı Kojenerasyon ve konvansiyonel elektrik üretimi ile Sankey diyagramı kullanarak karşılaştırılması (Koçak ve Gülşen, 1998)

Kojenerasyon, bileşik ısı-güç üretiminin ekonomik öneminin yanı sıra çevreye salınan atıklar yönünden de değerlendirildiğinde, önemi daha da artmaktadır. Elektrik üretimi amacı ile kurulmuş bir santralle kıyaslandığında, hemen hemen aynı miktarda yakıt kullanan bir kojenerasyon santralında, elde edilen her kW enerjiye karşılık çok daha az miktarda CO_2 , NO_x ve SO_2 gazları atmosfere bırakılmaktadır (Dilip, 1992).

Bir ısı makinasında (Şekil 2.4) üretilen işin (W) alınan ısıya (Q_H) oranı, ısıl verim (η) ya da kojenerasyon uygulamalarında “elektrik çevrim verimi” olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi ifade edilir (İnallı, Yücel, Işık, 2002).

$$\eta = W/Q_H \quad (2.1)$$



Şekil 2.4 Tersinir ısı makinesi (Çengel ve Boles, 1998)

Konvansiyonel sistemde çevreye atılan ısı (Q_L), kojenerasyon sisteminde kullanılarak enerjiden yararlanma oranı (EYO) maksimum düzeye çıkartılabilmektedir.

$$EYO = (W + Q_L) / Q_H \quad (2.2)$$

EYO'ya kojenerasyon uygulamalarında toplam verim de denilmektedir. Termodinamiğin birinci yasasına göre EYO, "1" olsa da, uygulamada atık ısının tamamından yararlanılamadığından, bu mümkün olmamaktadır. Bu atık ısıdan doğrudan ısı olarak yararlanılmadıkça, %35-55 aralığında verimler sağlanmıştır. Dünyadaki en iyi örneklerden birisi olmasına rağmen, Ambarlı Birleşik Çevrim Santrali'nde verim değeri %50 civarında kalmaktadır (Külçe ve Topuz, 1996). Oysa atık ısıdan yine ısı olarak faydalanan kojenerasyon sistemlerinde, enerjiden yararlanma oranını (EYO) %80-90'lara dek çıkarmak mümkün olmuştur.

Bileşik ısı-güç santrallerinde üretilen işin (elektrik) faydalanan atık ısıya oranı, elektrik ısı oranı (EIO) diye tanımlanır ve ısı verimle de gösterilebilir:

$$EIO = W / Q_L = \eta / (1 - \eta) \quad (2.3)$$

EIO, kojenerasyon sisteminin önemli özelliklerinden biri sayılmaktadır. Türbinlerde ise genellikle EIO'nın tersi olan ısı oranı (IO) temel parametrelerden biri olarak verilir (Lucas, 2000).

$$IO = Q_L / W = (1 - \eta) / \eta \quad (2.4)$$

2.1 Kojenerasyonun Önemli Teknik Parametreleri

Uygulanacak kojenerasyon sisteminin seçiminde etkili olan birçok parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler uygun sistemin seçilmesinde önemli rol oynamaktadırlar.

2.1.1 Isı Güç Oranı

Isı güç oranı, tesisin ihtiyacı olan ısı enerjisinin elektrik enerjisine oranıdır. Isı güç oranı, kojenerasyon sisteminin seçimine etki eden en önemli teknik parametrelerden biridir. Tesisin ısı güç oranı, kurulacak olan kojenerasyon sisteminin ısı güç oranı ile karşılaştırılmalıdır. Pistonlu motorda ısı güç oranı 1.1-2.5 arasındadır. Ayrıca, kojenerasyon amaçlı birleşik çevrimlerin ısı güç oranı da düşüktür. Eğer, gerekli ısı miktarı elektrik talebine oranla yüksek ise, genellikle buhar türbinleri veya ard yanmalı gaz türbinleri kullanılır. (Ağabay, 1993b)

Kojenerasyon santralının ürünleri, elektrik, proses buharı ve ısıtma buharıdır. Kojenerasyon sahibi, bu üç ürüne olan talebi ayrı ayrı tespit eder. Ürünlerden herhangi birisi tesisin talebini tam olarak karşılarken diğer talepler tam da karşılanmayabilir veya fazla üretim olabilir. Bu durumda, talep noktalarından birisinin tam olarak karşılanacağı model tanımlanır. Talebi karşılanmayan ürün bir başka kuruluştan ithal edilebilmeli, fazla üretilen ürün bir başka kuruluşa ihraç edilebilmelidir. Bir kojenerasyon santralının öncelikli ürünü, proses buharı olmalıdır. Çünkü proste kullanılan yüksek basınç ve sıcaklıktaki buharın özelliğini sabit tutmak çok zor, hatta olanaksızdır. Çizelge 2.1'de, kojenerasyon sistemlerinin ısı güç oranı ve toplam verimi gösterilmektedir. (Mohanty, 2001)

2.1.2 Isı Enerjisinin Kalitesi

Isı enerjisinin kalitesi, gerekli buhar veya gazın, sıcaklık ve basınç değeridir. Isı enerjisinin kalitesi, kojenerasyon sisteminin seçiminde önemli bir faktördür. Şeker üretimi için gerekli sıcaklık değeri 120 °C civarında olduğundan bu tesislere öncelikle elektrik enerjisi üretim

çevrimi önerilirken, 1450 °C civarında sıcaklık gerektiren çimento tesisleri gibi tesislere de öncelikli ısı enerjisi üretim çevrimli sistem önerilir. (Gürhan, 2003)

Çizelge 2.1 Kojenerasyon sistemlerinin ısı güç oranları ve verimleri (Mohanty, 2001)

Kojenerasyon Sistemleri	Isı Güç Oranı (kW _{th} /kW _e)	Güç Çıkışı (Sisteme giren yakıtın %)	Toplam Verim (%)
Karşı Basınç Türbini	4.0 - 14.3	14 - 28	84 – 92
Ara Buhar Almalı Yoğuşmalı Türbin	2.0 – 10.0	22 – 40	60 – 80
Gaz Türbinli	1.3 – 2.0	24 – 35	70 – 90
Birleşik Çevrim	1.0 – 1.7	34 - 40	69 – 83
Piston Motorlu	1.1 – 2.5	33 – 53	75 - 85

2.1.3 Yakıtların Kullanılabilirliği

Kullanılmak istenen yakıt türü sayısı arttıkça seçilen sistem gaz türbinine doğru yönelmektedir. Endüstriyel gaz türbini, uçak türevli gaz türbinine göre daha fazla tür yakıt yakabilme özelliğine sahiptir. (Gülşen ve Koçak, 1998)

2.1.4 Sistemin Güvenilirliği

Enerji tüketen tesisler güvenilir ısıya ve güce ihtiyaç duyar. Kojenerasyon tesisinin dizaynında, gelecekteki olası enerji talebi göz önüne alınmalıdır. Bu, uygun ekipmanın seçimine ve ihtiyaç durumunda yapılacak değişikliklere göre yapılan planlara yardımcı olur.

Tesiste, devamlı çalışma aktivitesi için yardımcı güç gerekebilir. Bunun için, ek yatırım yapılarak ilave bir üretim tesisi kurulabilir. Alternatif olarak, kamu elektrik üretim şirketi ile yedek bir anlaşma yapılabilir. Böylece, kojenerasyon tesisi her durduğunda şebekeden kontratta talepte bulunulan elektrik kullanılabilir. (Mohanty, 2001)

2.1.5 Elektrik Alımı ve Satımı

Kojenerasyon sistemi kurulurken yerel elektrik dağıtım kuruluşunun otoprodüktörlerden elektrik satın alıp almadığı dikkate alınmalıdır. Eğer, elektrik alımı söz konusu ise

kojenerasyon sisteminin tipi ve büyüklüğü farklı olmalıdır. (Mohanty, 2001)

2.1.6 Bölgesel Çevre Kuralları

Bölgesel çevre kuralları, kojenerasyon tesisi için gerekli yakıtların kullanımını sınırlayabilir. Eğer, bölgesel çevre kuralları çok katı ise kullanılacak bazı yakıtlar değerlendirmeye alınmaz. (Mohanty, 2001)

2.2 Kojenerasyonun Ekonomik Analizinde Anahtar Parametreler

Kojenerasyon projesinin ekonomik sürecinde aşağıdaki faktörler göz önünde bulundurulmalıdır : (Mohanty, 2001)

- İlk yatırım,
- İşletme ve bakım maliyeti,
- Yakıt maliyeti,
- Satın alınan ve satılan enerji maliyeti.

2.2.1 İlk Yatırım

İlk yatırım, kojenerasyon tesisinin maliyetini içeren çok önemli bir değişkendir. Başlangıçta, ön mühendislik ve planlama maliyeti dikkate alınmalıdır. Birkaç istisna durum haricinde otoprodüktör, ekonomik analiz için elde bulundurulmuş uygun alternatifleri tanımlamadan önce projenin teknik fizibilitesinin tamamlanması için bir danışman firmadan yardım alabilir. Kojenerasyon teçhizatının ithal edilmesi gerekiyorsa, geçerli olan vergiler, teçhizat maliyetine ilave edilmelidir. Bir işletme sahibi, kojenerasyon tesisinin parçalarını farklı imalatçılardan satın alabilir. Bu durumda, mekanik ve elektrik işleri, elektrik bağlantısı, yoğunlaştırıcı, soğutma kulesi ve kontrol teçhizatı gibi yardımcı parçaların oluşturacağı maliyet, ilk tesis ve kurulum maliyeti içerisinde yer almalıdır. (Gülşen ve Koçak, 1998; Sycom 1999)

2.2.2 İşletme ve Bakım Maliyeti

İşletme ve bakım maliyeti, kojenerasyon tesisinin işletilmesinde doğrudan ve dolaylı maliyetleri içermelidir. Örneğin; servis, ekipman bakım-onarımı, parça değişimi gibi. Ayrıca, yeni bir tesisin çalıştırılması için ek personel ihtiyacının oluşturacağı maliyete ilaveten eğitim

giderleri de dikkate alınmalıdır. Yıllık maliyetler, kojenerasyon tesisine bağı olarak oluşur. Örneğin, sigorta maliyeti ve varlık vergileri, analizler içerisinde yer almalıdır. Bunlar, genellikle başlangıç yatırımının sabit yüzdesi olarak hesaplanır.

2.2.3 Yakıt Maliyeti

Yakıt maliyeti, işletme maliyetlerinin en büyük parçasını oluşturabilir. Kojenerasyon tesisi uzun bir süre için çalıştırılması düşünüldüğü için, zaman içerisinde yakıt fiyatlarındaki yükselme gerçekçi olarak göz önünde tutulmalıdır.

2.2.4 Satılan ve Satın Alınan Enerji Maliyeti

Satılan ve satın alınan enerji fiyatları, önemli parametredir ve zamana bağı tarife, yedek fiyat, elektriğin alım satım oranlarını ve benzeri durumları içerir. Yakıta bağı olarak, elektrik fiyatlarında zamanla artış için bir koşul madde olmalıdır. Bu durum özellikle, güç üretiminin ciddi şekilde yakıta bağı olan yerlerde önemlidir.

3. EKSERJİ KAVRAMI

Termodinamiğin birinci kanunu, enerjinin bir şekilden diğerine dönüşebileceğini, bir sistemden diğer sisteme transfer edilebileceğini fakat, bu dönüşümler ve transferler esnasında toplamının sabit kalacağını ifade eder (Büyüktür, 1986). Sistemle çevresinin etkileşimi sırasında, sistem tarafından kazanılan enerji, çevre tarafından kaybedilen enerjiye eşit olmak zorundadır. Fakat etkileşim esnasında hal değişimleri belirli bir yönde gerçekleşirken, tersi yönde gerçekleşmez. Oysa birinci kanun, hal değişimlerinin yönü üzerine bir kısıtlama koymaz. Birinci yasanın bu yetersizliği termodinamiğin ikinci kanunu ile kapatılır (Çengel, 1994)

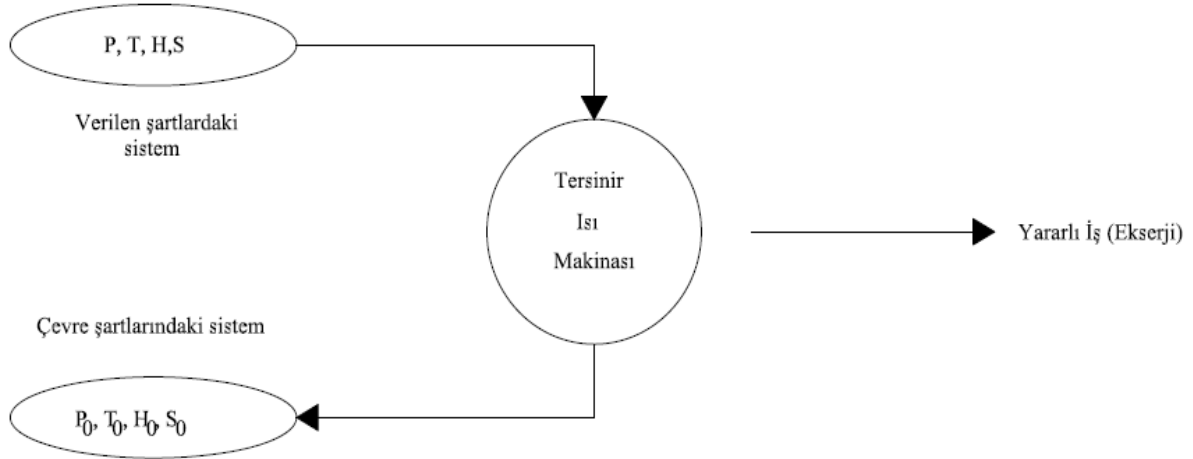
Termodinamiğin ikinci kanunu, bazı enerji dönüşümleri için sadece sistemden çıkan enerjinin iş potansiyelinin, sisteme giren enerjinin iş potansiyelinden daha küçük olduğunu ifade eder. Aradaki iş potansiyel farkı, söz konusu dönüşümde meydana gelen tersinmezliklere bağlıdır. Bu tersinmezlikler ortadan kaldırılabilirse, yani enerji dönüşümü tersinir olursa, sisteme giren ve çıkan enerjilerin iş potansiyelleri birbirine eşit olur. Ayrıca termodinamiğin ikinci kanunu, ısı enerjisinin sadece belirli bir kısmının işe çevrilebileceğini, çevrenin iç enerjisinden yararlanarak iş elde edilemeyeceğini belirterek, enerji dönüşümlerini sınırlamakta ve bütün doğal olayların tersinmez olduğuna dikkat çekerek, enerjinin bir şekilden diğer bir şekle her dönüşümünde veya bir sistemden diğer sisteme transferinde, insanların faydalanabilecekleri kısmının azalacağını ve bu nedenle sürekli olarak değer kaybedeceğini ifade etmektedir (Sevilgen, 2002).

Ekserji terimi, Yunanca ex (dış) ve argon (kuvvet ve iş) kelimelerinden türetilmiş ve ilk kez 1824 yılında Carnot tarafından kullanılmıştır (Wall, 1998). Ekserji analizi konusundaki çalışmalar ise Gouy ve Stodala ile başlamıştır. Bu yüzyılın başlarında, Jouguet, Lewiss ve Randall, DeBaufre, Darrieus, Keenan, Lerberghe ve Glansdorf gibi bilim adamlarının termodinamiğin ve ekserji kavramının gelişimine büyük katkıları olmuştur. 1935’de Bosnjakovic, ekserji kavramının sistemlerin termodinamik analizlerinde uygulama çalışmalarını başlatmıştır (Riviero, 1997).

Rant, 1956’da ilk olarak “ekserji” terimini kullanmıştır. Bu terim, aynı kavram için kullanılan diğer terimlerden farklı olarak, uluslararası bir kabul görmüştür.

Rant ekserjiyi, tamamen başka bir enerjiye dönüşen enerjinin bir çeşidi olarak tanımlamıştır (Şekil 3.1) (Szargut, 1988). Baehr ise ekserjiyi, verilmiş bir ortamda bütün diğer enerji

türlerine dönüştürülebilen kullanılan enerji olarak ifade etmiştir (Arıkol, 1985). Daha sonraları ekserji, verilen şartlarda, çevre ile aynı şartlara (ölü hal) getirilmesi sonucu bir sistemden elde edilebilecek maksimum iş şeklinde tanımlanmıştır (Kotas, 1995).



Şekil 3.1 Verilen durum ile çevre şartları arasında çalışan tersinir bir ısı makinası (Çomaklı vd, 2004)

Ekserji, sistem halinin çevre haline uzaklığının bir ölçüsüdür. Dolayısıyla, sistemin ve çevrenin birlikte bir özelliğidir. Ancak, çevre belirtildiğinde, ekserjiye sadece sistem özelliklerinin değerleri cinsinden bir değer verilebilir; böylece, ekserji, sistemin ekstensif bir özelliği sayılabilir. Ekserji diğer ekstensif özellikler (kütle, enerji ve entropi) gibi sistemler arasında aktarılabilir (Bejan, 1996)

Ekserji, yok edilebilir ve genelde korunmaz. Bir sistemin çevre ile aniden dengeye geldiği ve hiç iş elde edilemediği durum, ekserjinin tamamen yok edildiği, sınır durumudur. Başlangıçta var olan iş yapabilme kapasitesi, ani proseste tamamen harcanır. Ayrıca, böyle ani bir değişikliği sağlamak için iş gerekmediği için, ekserjinin değeri negatif olamaz ve en azından sıfırdır (Bejan, 1996).

Her fazının intensif özellikleri üniform olan ve herhangi bir proses sonunda fazla değişmeyen, ortamın bir bölümüne çevre denir. Çevrede tersinmezliklerin bulunmadığı, tüm tersinmezliklerin sistem içinde ve onun hemen yakınındaki ortamda bulunduğu kabul edilir. Çevrenin intensif özelliklerinin değişmediği kabul edilse de başka sistemlerle etkileşmelerinin bir sonucu olarak, ekstensif özellikleri değişebilir. Kinetik ve potansiyel enerjiler, tüm kısımları birbirine göre hareketsiz sayılan çevredeki koordinatlara göre değerlendirilir.

Dolayısıyla, çevrenin enerjisindeki bir değişiklik, sadece kendi iç enerjisindeki bir değişikliktir (Bejan, 1996).

Enerji ve ekserji arasındaki karşılaştırma aşağıdaki Çizelge 3.1’de görülmektedir.

Çizelge 3.1 Enerji ve ekserjinin karşılaştırılması (Dinçer, 2000)

ENERJİ	EKSERJİ
Sadece enerji akışı ya da madde akışı parametrelerine bağımlı ve çevre parametrelerinden bağımsız.	Madde ya da enerji akışı parametrelerine ve çevre parametrelerine bağımlı.
Sıfırdan farklı değerlere sahiptir (enerji Einstein'ın ifadesine göre mc^2 'ye eşittir).	Sıfıra eşit olabilir (çevre ile dengede, ölü hal durumunda).
Bütün prosesler için termodinamiğin birinci yasası uygulanır.	Sadece tersinir prosesler için termodinamiğin birinci yasası uygulanır (tersinmez proseslerde kısmen veya tamamen tahrip edilir).
Bütün prosesler için termodinamiğin ikinci yasası, enerji dönüşümlerinin yönü ve verimliliğini kısıtlar.	Tersinir prosesler için termodinamiğin ikinci yasası ekserjiyi kısıtlamaz.
Hareket ya da hareket ettirme kapasitesidir.	İş ya da iş yapabilme kapasitedir.
Bir prosesin toplam enerjisi her zaman korunur.	Tersinir bir proseste ekserji her zaman korunur, fakat tersinmez bir proseste her zaman yok edilir.
Niceliğin bir ölçüsüdür.	Niteliğin bir ölçüsüdür.

4. EKSERJİ ANALİZİ

Enerji korunumu kavramının ön plana çıkmasıyla ikinci kanunu baz alan analiz teknikleri geliştirilmiştir. Özellikle de ekserji kavramı belirginlik kazanmıştır (Valero, 1994).

Ekserji dengesi en çok termik santrallerin analizinde kullanılır. Ekserji dengesi de enerji dengesi benzer ama bazı temel farklılıklar vardır. Enerji dengesi, enerji dönüşüm kanunlarına, ekserji dengesi ise enerjinin tersinmezliği kanununa dayanır. (Kotas, 1984) Ekserji dengesi prosesteki tersinmezliklerin hesabına ve genel verimi azaltıcı tesir eden ünitelerin tanımlanmasında önemli rol oynar. (Valero, 1994)

Ekserji analizi, enerji kaynaklarının daha verimli kullanımı için uygundur. Bunun için, sistemin atık ve kayıp miktarı iyi tespit edilmelidir. Çünkü dizayn edilen enerji sistemlerinin verimi ya da mevcut sistemlerin verimlerinin arttırılması için bu bilgiler kullanılır. Sistemler birinci kanuna göre analiz edilince oluşan eksiklikler, ekserji analizi ile telafi edilir. Birinci kanun baz alındığında termik santraller için verimi azaltan eleman kondenserdir. Çünkü, sistemdeki ısıнын sistem dışına atıldığı elemandır. Bu nedenle kondenser verimsizlik kaynağı olarak görülebilir. Sisteme ekserji analizi yapıldığında ise kayıplar ve tersinmezlikler açısından kazanın kondenserdan daha önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Bir başka deyişle, ekserji analizi ile, kondenser kadar kazanın da sistemin verimi üzerinde etkisi olduğu anlaşılır (Bejan, 1996).

Ekserji analizi için çevre tanımı yapılırken temel ilke, çevrenin tam bir denge durumunda olmasıdır. Bir madde akımının ekserjisi değerlendirilirken, çevrenin ısı ekserjisinin sıfır olduğu ve serbestçe tanımlanan yaygın çevresel maddelerden oluştuğu kabul edilir. Bu yaygın çevresel maddeler, birbirleriyle denge halindedir ve bunların ölü hal durumunda oldukları söylenir (Arıkol, 1985).

Bir sistem ölü halde iken çevresi ile eşit sıcaklık ve basınçtır. Yani çevre ile ısı ve mekanik ya da termodinamik dengededir. Ayrıca, sistemin çevresine göre kinetik ve potansiyel enerjileri sıfırdır. Sistem ölü halde iken çevresiyle kimyasal reaksiyona giremez. Sistemin ölü hal özellikleri P_0 , T_0 , h_0 , u_0 ve S_0 'dır. Ölü hal durumunda $P_0=1$ atm (101,325 kPa) ve $T_0=25^\circ\text{C}$ (298,15 K)'dir (Çengel ve Boles, 1994).

Kısıtlı hal (yarı ölü) durumu, sadece mekanik ve ısı denginin sağlanması gereken kısıtlı bir denge şeklidir. Bu durumda, çevre koordinatlarına göre sıfır hız ve yükseklikte, T_0 ve P_0 'da,

kütlesel akış olmaksızın dolayısıyla sabit miktarda madde incelenir (Bejan, 1996).

Enerjinin faydalı kısmını ekserji oluştururken enerjinin kullanılmayan yani bir başka enerji türüne dönüştürülemeyen kısmı anergi olarak adlandırılır. Dolayısıyla, bütün enerji türleri için en genel ifade şöyle yazılabilir (Szargut, 1988):

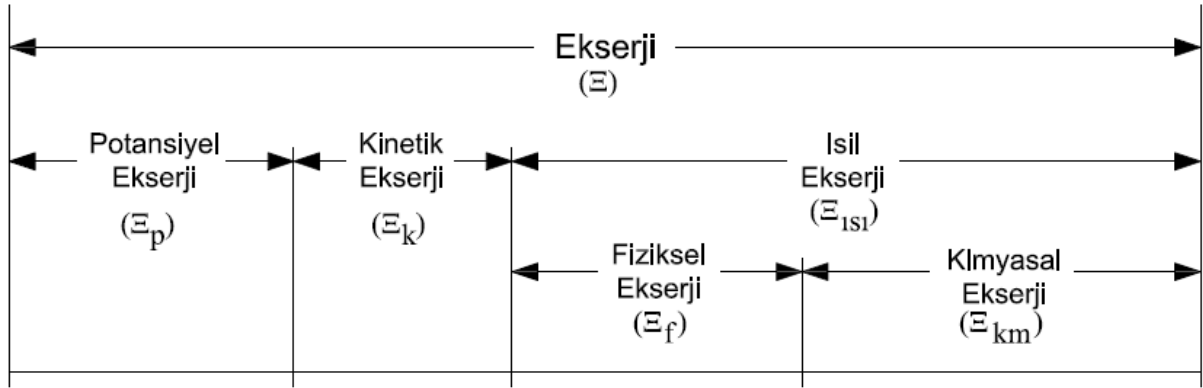
$$\text{Enerji} = \text{Ekserji} + \text{Anerji}$$

Elektrik enerjisi ve mekanik enerji gibi enerji türlerinin anergi bölümü sıfıra eşittir. Aynı şekilde, çevrenin iç enerjisinin tamamı anergi olduğu için çevre enerjisinin ekserjisi de sıfıra eşit olur (Kotas, 1995).

4.1 Ekserji Bileşenleri

Nükleer, manyetik, elektriksel ve yüzey gerilim etkileri yokluğunda, bir sistemin toplam ekserjisi, Ξ , Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, dört bileşenden oluşur: fiziksel ekserji Ξ_f , kinetik ekserji Ξ_k , potansiyel ekserji Ξ_p ve kimyasal ekserji Ξ_{km} (Szargut, 1988).

$$\Xi = \Xi_f + \Xi_k + \Xi_p + \Xi_{km} \quad (4.1)$$



Şekil 4.1 Ekserji bileşenleri (Szargut, 1988)

Çevreye göre değerlendirildiğinde, bir sistemin kinetik ve potansiyel enerjileri çevreye göre dengeye getirilirken presipte tamamen işe dönüşür. Bundan dolayı,

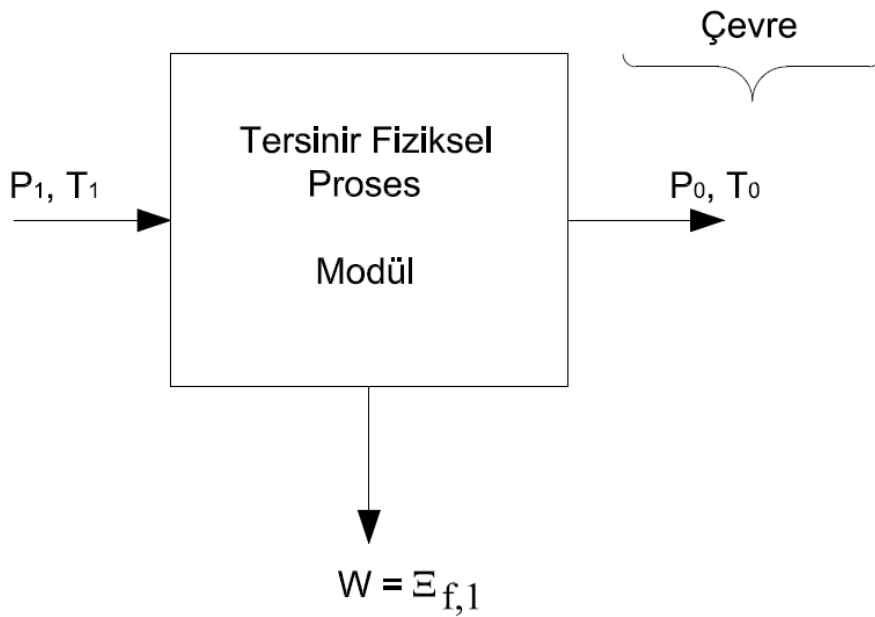
$$\Xi_k = 1/2 V^2 \quad (4.2)$$

$$\Xi_p = gz \quad (4.3)$$

Burada, V ve z sırasıyla, çevre koordinatlarına göre hızı ve yüksekliği belirtir.

Çevreye göre hareketsiz olan bir sistemin ($\Xi_k = \Xi_p = 0$) fiziksel ekserjisi (Ξ_f), sistem T sıcaklığı ve P basıncındaki ilk halinden, T_0 sıcaklığı ve P_0 basıncındaki kısıtlı ölü hale geçerken elde edilebilen maksimum teorik iştir. Kimyasal ekserji (Ξ_{km}) ise, sistem kısıtlı ölü halden, çevre ile tam dengede olduğu ölü hale geçerken elde edilebilen maksimum teorik yararlı iştir. (Cornelissen, 1997).

Verilen herhangi durumdaki bir sistemin fiziksel ekserjisi Şekil 4.2’de T-S diyagramında gösterilmiştir (Kotas, 1995).



Şekil 4.2 Fiziksel ekserji tayini için tersinir bir modül (Kotas, 1998)

Herhangi bir durumdaki bir sistemin fiziksel ekserjisi Şekil 4.3’de görüldüğü gibi;

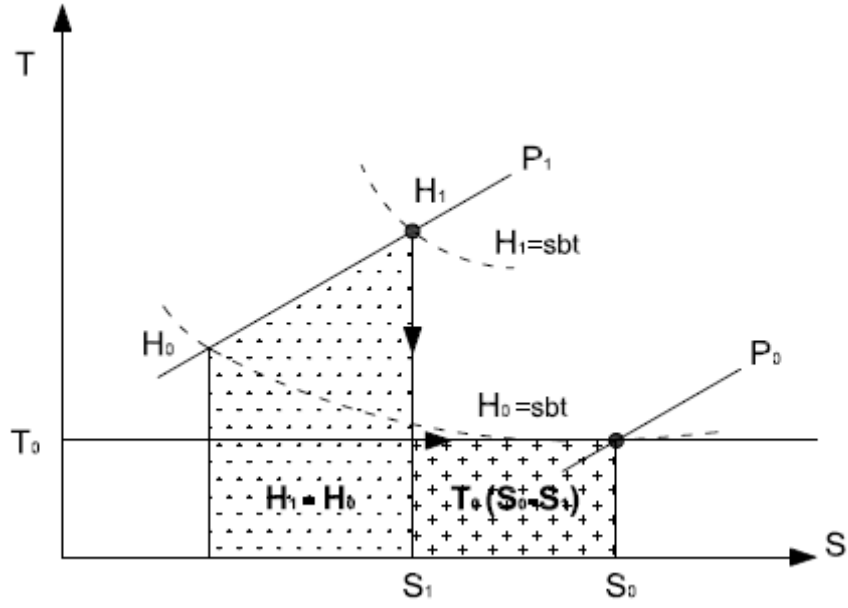
$$\Xi_f = (H_1 - H_0) - T_0(S_1 - S_0) \quad (4.4)$$

Burada, H ve S sırasıyla, sistemin belirli haldeki entalpi ve entropisi; H_0 ve S_0 ise sırasıyla kısıtlı ölü haldeki entalpi ve entropisidir.

Eğer bir sistemde iki durum arasındaki fiziksel ekserji farkı söz konusu ise, Şekil 4.4’den;

$$\Xi_{f1} - \Xi_{f2} = (H_1 - H_2) - T_0(S_1 - S_2) \quad (4.5)$$

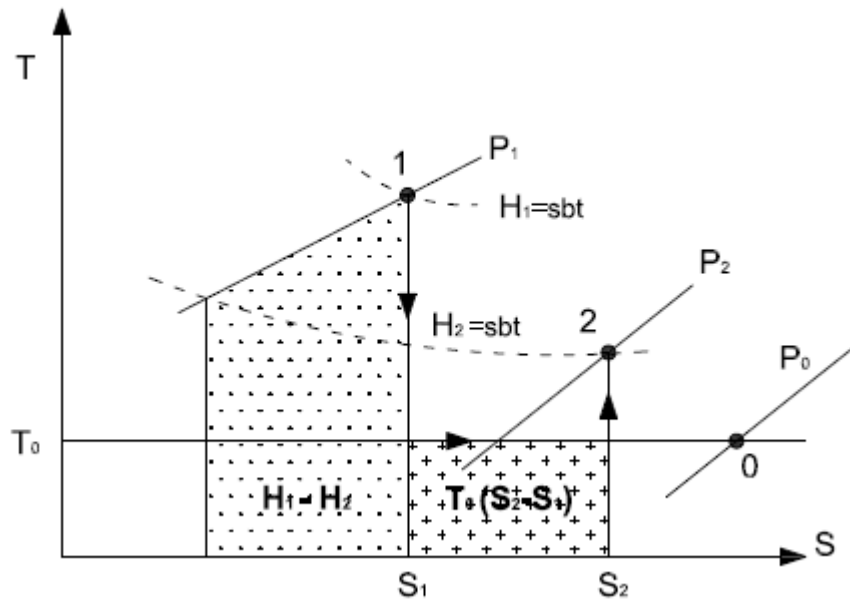
şeklinde ifade edilir.



Şekil 4.3 Verilen durum ile çevre arasındaki fiziksel ekserji farkı (Kotas, 1998)

Fiziksel ekserji aşağıda gösterildiği gibi, iki bileşenden oluşmaktadır.

$$\Xi_f = \Xi^{\Delta T} + \Xi^{\Delta P} \quad (4.6)$$



Şekil 4.4 Verilen iki durum arasındaki fiziksel ekserji farkı (Kotas, 1998)

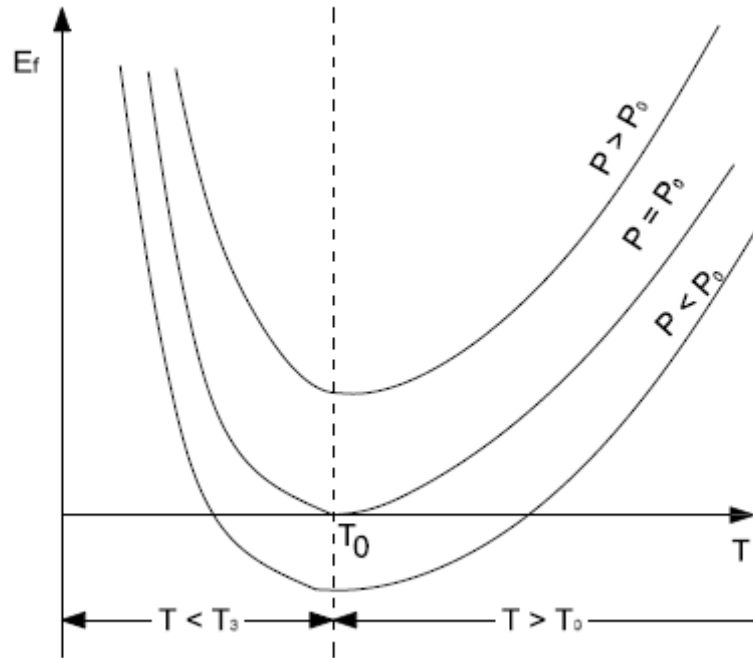
Birinci terim fiziksel ekserjinin ısı bileşeni olup, sıcaklık farkından dolayı ortaya çıkmaktadır

ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Xi^{\Delta T} = \left[- \int_{T_1}^{T_0} \frac{T - T_0}{T} dh \right]_P \quad (4.7)$$

İkinci terim ise basınç bileşeni olup, basınç farkından dolayı meydana gelmektedir. Basınç bileşeni izotermal durumda gerçek gazlar ve sıvılar için kullanılır ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Xi^{\Delta P} = (H_1 - H_0) - T_0(S_1 - S_0) \quad (4.8)$$



Şekil 4.5 Gazlar için ekserji diyagramı (Kotas, 1995)

İdeal gazdan oluşan herhangi bir durumda ve bir sistemin fiziksel ekserjisi Denklem 4.9 ile hesaplanabilir. Şekil 4.5’da ideal gazlar için fiziksel ekserji diyagramı görülmektedir. (Çomaklı, Karslı, Yılmaz, 2004).

$$\Xi_f = \left[(H - H_0) - T_0 \cdot (S - S_0) \right] + \Sigma RT_0 \ln P / P_0 \quad (4.9)$$

Katı veya sıvıdan oluşan herhangi bir durumdaki bir sistemin fiziksel ekserjisi (4.10) eşitliği

ile hesaplanabilir.

$$\Xi_f = [(H - H_0) - T_0(S - S_0)] + V(P - P_0) \quad (4.10)$$

Uygun bazı çevre malzemelerinin özellikleri referans alınarak maddelerin standart kimyasal ekserjileri hesaplanmıştır. Standart kimyasal ekserjiler standart çevre (ölü hal durumu) sıcaklığına ($T_0=25^\circ\text{C}$) ve basıncına ($P_0=1 \text{ atm}$) bağlıdır (Kotas, 1995).

Referans maddeler genellikle üç grupta toplanmıştır;

- Atmosferdeki gaz bileşenler,
- Litosferdeki katı maddeler,
- Hidrosferdeki iyonik ve iyonik olmayan maddeler.

Çizelge 4.1’de bazı maddelerin standart kimyasal ekserji değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.1 Bazı maddelerin standart kimyasal ekserjileri (Bejan, 1996)

Madde	Faz	Mol Ağırlığı (kg/mol)	Standart Kimyasal Ekserjisi (kJ/kmol)
Azot N_2	Gaz	46	639
Karbondioksit CO_2	Gaz	44	14176
Oksijen O_2	Gaz	32	3951
Etan C_2H_6	Gaz	30	1482033
Metan CH_4	Gaz	16	8244348
Su H_2O	Gaz	18	8636
Su H_2O	Sıvı	18	45

Standart ekserji referans çevrelerinin ortak bir özelliği, havayı temsil etmeyi amaçlayan ve N_2 , O_2 , CO_2 , $\text{H}_2\text{O}(\text{gaz})$ ve başka gazlar içeren bir gaz fazıdır. Çevre gaz fazında bulunan bir gazın standart kimyasal ekserjisi şöyle hesaplanır: k gazı T_0 ve P_0 ’da girer, çevre ile sadece ısı

aktarımı gösteren sistemde izotermal olarak genişler ve T_0 ve $x_k^e P_0$ 'da sistemden çıkar. k gazı, T_0 sıcaklığında ve $p_k^e = x_k^e p_0$ kısmi basıncındadır. Buradaki x_k^e , k gazının çevre gaz fazındaki mol kesridir, e ise çevre için kullanılmaktadır. Maksimum teorik iş genişleme tersinir olduğu zaman elde edilir. Bir mol k gazı başına, kimyasal ekserji şöyle yazılır (Bejan, 1996):

$$\begin{aligned}\Xi_{km,k} &= -RT_0 \ln(x_k^e P_0 / P_0) \\ &= -RT_0 \ln x_k^e\end{aligned}\quad (4.11)$$

Bir gaz karışımının kimyasal ekserjisi ise benzer şekilde bulunabilir:

$$\begin{aligned}e_{km,k} &= -RT_0 \sum \ln(x_k^e / x_k) \\ &= \sum x_k e_{km,k} + RT_0 \sum_N x_k \ln x_k^e\end{aligned}\quad (4.12)$$

Yakıt olan bir maddenin kimyasal ekserjisinin hesabında, o maddenin, standart kimyasal ekserjileri bilinen başka maddelerle tepkimesi ele alınır ve aşağıdaki ifade yazılır:

$$e_{km} = -\Delta G + \left\{ \sum_{\zeta} n e_{\zeta} - \sum_g n e_g \right\} \quad (4.13)$$

Burada, ΔG , tepkimenin Gibbs fonksiyonundaki değişiklik; n , maddenin mol sayısı; ζ , ürün ve g ise giren için kullanılır (Bejan, 1996).

4.2 Ekserji Denkliği

Kapalı bir sistemin ekserji denkliği, enerji (4.14) ve entropi (4.15) denklıkları birleştirilerek kurulur (Çengel ve Boles, 1998).

$$(U_2 - U_1) + (KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) = \int_1^2 \delta Q - W \quad (4.14)$$

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 (\delta Q / T)_b + S_{irr} \quad (4.15)$$

Entropi denkliği T_0 ile çarpılır ve elde edilen ifade enerji denkliğinden çıkarılır:

$$(U_2 - U_1) + (KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) - T_0 (S_2 - S_1) = \int_1^2 \delta Q - W - T_0 \int_1^2 (\delta Q / T)_b - T_0 S_{irr} \quad (4.16)$$

δQ ile ilgili terimler bir tarafa toplanır; ilgili terimler yerine $\Xi_2 - \Xi_1$ yerleştirilir.

$$(\Xi_2 - \Xi_1) - P_0(V_2 - V_1) = \int_1^2 (1 - T_0/T_b) \delta Q - W - T_0 S_{ür} \quad (4.17)$$

Böylece, kapalı sistemlerdeki ekserji denkliği aşağıdaki gibi yazılır:

$$\underbrace{\Xi_2 - \Xi_1}_{\text{Ekserji farkı}} = \underbrace{\int_1^2 (1 - T_0/T_b) \delta Q - [W - P_0(V_2 - V_1)]}_{\text{Enerji aktarım ekserjisi } (\Xi_L)} - \underbrace{T_0 S_{ür}}_{\text{Ekserji Tahribi } (\Xi_T)} \quad (4.18)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Isı aktarımı ile ekserji aktarımı } (\Xi_{is})} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{İş aktarımı ile ekserji aktarımı } (\Xi_{iş})}$

veya;

$$d\Xi/dt = \sum_j (1 - T_0/T_j) Q_j - [W - P_0(dV/dt)] - T_0 S_{ür} \quad (4.19)$$

$$\Delta\Xi = \Xi_{is} + \Xi_{iş} - \Xi_T = \Xi_L - \Xi_T \quad (4.20)$$

Kütle, enerji ve entropi gibi, ekserji de ekstensif bir özelliktir ve madde akımlarının girdiği (m_g) ve çıktığı ($m_ç$) yerlerde kontrol hacmine veya dışına aktarılabilir. Aşağıdaki (4.21) eşitliğinde kontrol hacmi ekserji denkliği gösterilmektedir (Bejan, 1996).

$$\underbrace{d\Xi_{CV}/dt}_{\text{Ekserji değişim oranı}} = \underbrace{\sum_j (1 - T_0/T_j) Q_j - [W_{CV} - P_0(dV_{CV}/dt)] + \sum_g m_g e_g - \sum_ç m_ç e_ç}_{\text{Ekserji aktarım oranı}} - \underbrace{\Xi_T}_{\text{Ekserji tahrip oranı}} \quad (4.21)$$

Burada, g ve ç alt indisleri sırasıyla, giriş ve çıkış için kullanılır.

Kararlı yatışkın halde, $d\Xi_{CV}/dt = 0$ ve $dV_{CV}/dt = 0$ 'dır. Kontrol hacmi kararlı yatışkın hal şekli (4.22) eşitliğinde gösterilmiştir.

$$0 = \sum_j (1 - T_0/T_j) Q_j - [W_{CV} - P_0(dV_{CV}/dt)] + \sum_g m_g e_g - \sum_ç m_ç e_ç - \Xi_T \quad (4.22)$$

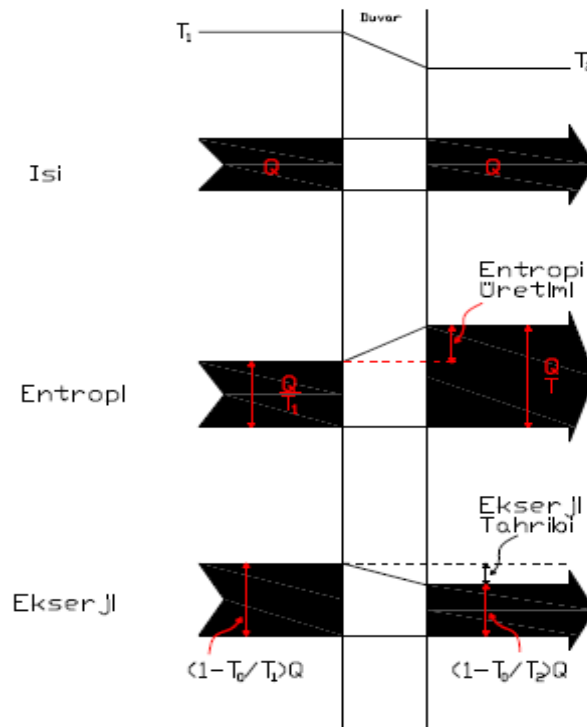
Şekil 4.6'da şematik olarak, ısı, entropi ve ekserji aktarımı karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

Bir sistemin ekserji kaybı, (4.23) eşitliğinden hesaplanabilir. Denklemden de görüldüğü gibi, ekserji kaybı net entropi değişimi ile çevre sıcaklığının çarpımına eşittir (Szargut, 1988).

$$\Xi_T = T_0 \Delta S = T_0 \Delta S_{irr} \quad (4.23)$$

Denklem (4.23) ifadesine Ekserji Kaybı Yasası veya Gouy-Stodola teoremi denir. Ayrıca, ekserji kaybı, (4.24) eşitliğinde ifade edildiği gibi, tersinmezliklerden dolayı kaybedilen işe eşittir.

$$\Xi_T = W_{kayıp} \quad (4.24)$$



Şekil 4.6 Sonlu sıcaklık farkı nedeniyle yer alan ısı aktarımı süresince ekserji aktarımı ve tahribi (Çengel ve Boles, 1998)

4.3 Performans Kriterleri

Sistemlerdeki verimliliğin göstergesi olan performansın iyilik derecesi doğrudan enerji girdisini etkilemektedir. Bundan dolayı, enerji sistemleri için çeşitli performans kriterleri geliştirilmiş ve sistemlerin iyilik dereceleri bu kriterlere göre değerlendirilmiştir.

Isıl sistemlerin ekserji analizi ile birlikte, çeşitli araştırmacılar tarafından termodinamiğin ikinci yasasına dayalı değişik isimlerde yeni performans kriterleri geliştirilmiştir. Bunlar, rasyonel verim, tersinmezlik oranı ve geliştirme potansiyelidir (Szargut, 1988). Bir sistemin

bu performans kriterleri temelinde performansı, aynı ekserji ve tersinmezlik değerlerinden hareketle hesaplanmaktadır.

4.3.1 Rasyonel Verim

Bir sistemden alınan veya arzu edilen ekserjinin sisteme verilen ekserjiye oranı olarak tanımlanır. Başka bir tanımla; ürünlerin ekserjisinin, yakıtların ekserjisine oranı rasyonel verimdir.

$$\sum \Delta \Xi_g = \sum \Delta \Xi_\zeta + \Xi_T \quad (4.25)$$

şeklinde verilmektedir. Burada $\sum \Delta \Xi_g$, sisteme giren toplam ekserji transferini, $\sum \Delta \Xi_\zeta$, sistemden alınan toplam ekserji çıktısını ve Ξ_T , sistemin toplam tersinmezliğini ifade etmektedir. Bu ekserji dengesinden hareketle rasyonel verim aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\varepsilon = \sum \Delta \Xi_\zeta / \sum \Delta \Xi_g \quad (4.26)$$

veya;

$$\varepsilon = 1 - \Xi_T / \sum \Delta \Xi_g \quad (4.27)$$

4.3.2 Tersinmezlik Oranı

Yapılan çalışmalarda iki farklı tersinmezlik oranı tanımlanmıştır. Bunlardan biri sistemin toplam tersinmezliğinin veya sistemin her bir elemanındaki tersinmezliğin sisteme giren toplam ekserjiye oranıdır. Tersinmezlik oranına aynı zamanda kayıp ekserji oranı da denilmektedir ve bu oran:

$$y = \sum_i \Xi_{Ti} / \sum \Delta \Xi_{x,g} \quad (4.28)$$

bağıntılarından hesaplanmaktadır. Bir sistemde rasyonel verim ve y_i 'lerin toplamı 1'e eşittir.

$$\varepsilon = y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_N = 1 \quad (4.29)$$

Bir diğer tersinmezlik oranı ise; sistemdeki her bir elemanın tersinmezliğinin sistemin toplam tersinmezliğine oranıdır ve aşağıdaki gibi gösterilir.

$$y_i = \sum_i \Xi_{Ti} / \Xi_T \quad (4.30)$$

Tersinmezlik oranları kullanılarak bir sistemin benzer veya farklı elemanları arasında performans karşılaştırılması yapılabilir. Bu sayede her bir elemanın ne ölçüde iyileştirilebileceğine karar verme olanağı sağlamaktadır.

4.3.3 Geliştirme Potansiyeli

Geliştirme potansiyeli, bir sistemin iyileştirilmesinin ne kadar miktarda ve ne kadar kolay yapılabileceğinin bir ölçüsüdür ve üç kısımdan oluşur: sistemin geliştirilebilme kolaylığını belirleyen bağıl potansiyel ($1-\varepsilon$), sistemin geliştirilebilme derecesinin bir ölçüsü olan mutlak potansiyel (Ξ_T), çevreye atılan ekserjik akımların azaltılması ile sistemin geliştirilebilme derecesini gösteren çevresel potansiyel ($\sum \Xi_A$).

$$G_{pot} = \Xi_T (1 - \varepsilon) + \sum \Xi_A \quad (4.31)$$

5. EKSERJOEKONOMİK ANALİZ

Ekserji analizi ile sistemde verimin düştüğü yerler tespit edilip ekserji verimini artırıcı çalışmaların yapılabilmesi amaçlanmaktadır. Fakat bir sistemin dizaynında tek başına ekserji analizi yeterli değildir. Sırf ekserji analizi ile verimi arttırmaya yönelik yapılan çalışmalar elemanların maliyetlerini büyük oranda artırmaktadır. Bu sebeple maliyet analizi göz önünde tutularak ekserji analizi ile beraber değerlendirmelidir. Ekserjoekonomik analiz bu iki faktörden oluşmaktadır.

Ekserjoekonominin amacı, ekserji maliyetini minimize etmektedir. Ekserji maliyeti, sistemin çevresiyle etkileşiminin ve sistem içindeki tersinmezliklerin maliyete etkisini incelemektedir. Sistemdeki tersinmezlikler ürün maliyetini artırır. Bu nedenle, sistem içerisindeki tersinmezliklerin meydana geldiği yerler ve miktarları tespit edilir, daha sonra ekserjoekonomik analiz ile ürün maliyeti içerisindeki payları bulunur. Sistem bir veya birden fazla ürün verebilir. Bu durumda her bir ürünün fiyatı içerisindeki tersinmezliklerin payı ayrı ayrı hesaplanır (Sevilgen, 2002)

5.1 Maliyet Denge Denklemleri

Bir kojenerasyon santralının maliyet analizinin yapılabilmesi için, sistemin ilk yatırım maliyeti, yakıt maliyeti ve işletme ve bakım maliyetinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu değerlerin yer aldığı ve ürün maliyetini veren denklem maliyet denklemidir.

$$M_{\bar{u}} = M_y + I + OM \quad (5.1)$$

Burada, $M_{\bar{u}}$, ürün maliyetini, M_y , yakıt maliyetini, I , yatırım maliyetini ve OM , işletme ve bakım maliyetini ifade eder.

Kojenerasyon sistemlerinin ilk yatırım maliyetleri sistemin tipine ve istenen kapasiteye bağlı olarak önemli değişiklikler gösterir. Tesisin toplam yatırım maliyeti değerinin bir yıl için ne kadarının karşılandığı (amortismanı) bir değere getirilmiş maliyetler üzerinden hesaplanır. En sık kullanılan yöntem, tesisin yatırım ömrü boyunca her yıl eşit miktarda amortisman sağlayacağı düşünülerek yapılan hesaplamalardır. (Sürer,2003)

İşletme ve bakım masrafları kullanma süresi veya şebeke yük faktörüne bağlı olmayan yıllık sabit masraflar ve üretilen enerji ile orantılı yıllık değişken masraflardan oluşmaktadır.

Yakıt maliyeti, yakıtın birim fiyatı ile yıllık tüketiminin bir fonksiyonudur. Yıllık yakıt tüketimini etkileyen faktörler ise yakıtın alt ısı değeri, tesisin yıllık çalışma saati ve yanma verimidir.

Yatırım maliyeti ve işletme ve bakım maliyeti sistemin karakteristik özelliği olduğundan beraber ele alınmıştır. (Sevilgen, 2002)

$$K = I + OM \quad (5.2)$$

$$M_{\bar{u}} = M_y + K \quad (5.3)$$

5.2 Ekserjoekonomik Denge Denklemi

Ekserjoekonomik denge denklemi yazılırken amaç, ekserji maliyetinin belirlenmesidir. Ekserji maliyeti, ekserji akışı ile ilgilidir. Sistemin ya da elemanın ekserjisi, giriş ve çıkış ekserji değerlerine göre yazılır. Sistem çevresi ile ısı ve iş alış verişindedir. Bu etkileşim esnasındaki tersinmezlikler ekserji bozunumlarıdır. Ürün değerinin belirlenmesi için bu bozunumlar önem arz eder. (Sevilgen, 2002)

Ekserji maliyetinde sistemin çevreyle etkileşimi ve sistemdeki tersinmezliklerin aynı anda maliyete etkisi incelenir. Bu amaçla ekserji maliyet denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sum \dot{M}_{\dot{\epsilon}} + \dot{M}_w = \sum \dot{M}_g + \dot{M}_q + K \quad (5.4)$$

$$\dot{M}_{\dot{\epsilon}} = c_{\dot{\epsilon}} \dot{E}_{\dot{\epsilon}} = c_{\dot{\epsilon}} (\dot{m}_{\dot{\epsilon}} e_{\dot{\epsilon}}) \quad (\text{Çıkanların ekserji maliyeti}) \quad (5.5)$$

$$\dot{M}_g = c_g \dot{E}_g = c_g (\dot{m}_g e_g) \quad (\text{Girenlerin ekserji maliyeti}) \quad (5.6)$$

$$\dot{M}_w = c_w \dot{W} \quad (\text{İşin ekserji maliyeti}) \quad (5.7)$$

$$\dot{M}_q = c_q \dot{E}_q \quad (\text{Isının ekserji maliyeti}) \quad (5.8)$$

$$\sum (c_{\dot{\epsilon}} \dot{E}_{\dot{\epsilon}})_k + (c_w \dot{W})_k = \sum (c_g \dot{E}_g)_k + (c_q \dot{E}_q)_k + K \quad (5.9)$$

Sistem için yazılan 5.9 numaralı ekserji maliyet denkleminde ısı ve iş yeri sistemin şartlarına göre ürün ya da girdi olarak değişir. Örneğin, kompresörde iş girdi olduğundan denklemin sağ tarafında olmalıdır. Denkleminde c ile gösterilen birim ekserji maliyetidir.

Analizde, her bir elemanın giriş ekserji maliyeti bir önceki elemanın çıkış değeri olduğu ya da dışardan alındığı için biliniyor kabul edilir. Sonuç olarak, denklemde bilinmeyen ürünün ekserji maliyetidir. (Sevilgen, 2002)

6. KOJENERASYON TESİSİNİN TANITIMI, EKSERJİ, EKONOMİ VE EKSERJİ EKONOMİ ANALİZLERİ

Teze konu olan enerji santrali, bir gaz türbini, bir ısı geri kazanımı buhar üreticisi (HRSG) ve bir buhar türbininden oluşan güç üretim ünitelerinin yardımıyla elektrik üretimi için tasarlanmıştır.

Güç bloğu, 220 MW'lık elektrik çıktısı ile 95°C'de bölgesel ısıtma suyu sağlamak için 0-160 MW ısı aralığında ısı çıktısı olan çoklu şaft düzeninden oluşmaktadır.

Gaz türbini için yakıt doğal gaz olup, gaz türbini egzost gazının ısısı, ısı geri kazanımı buhar üreticisinde buhar üretmek için kullanılır. Üretilen buhar, buhar türbininde genişletilir. İki türbin yardımıyla üretilen mekanik enerji, jeneratörlerde 15kV, 3 faz ve 50 Hz de elektrik enerjisine dönüştürülür.

Buhar türbininden çekilen buharın ısı enerjisi, bölgesel ısıtma eşanjöründe sıcak suya dönüştürülür. Geriye kalan atık ısı ise soğutma kulesi yardımıyla atmosfere atılır.

Proje operasyon birimleri ve inşai objeler olarak temel iki kısımdan oluşmaktadır. Operasyon birimleri tesisi oluşturan sistemlerdir. Bunlar;

- Gaz türbini / jeneratör birimi,
- Isı geri kazanımı buhar üreticisi (HRSG),
- Buhar türbini / jeneratör birimi ve bölgesel ısıtma sistemi,
- Gaz kompresörü
- Ana soğutma sistemi
- Kapalı çevrim soğuk su sistemi
- Hava kompresörü
- Su kimyasal işleme sistemi
- Ham su sistemi
- Yangın sistemi

- Dizel jeneratörü

Tesisi oluşturan inşai objeler ise aşağıda sıralandığı gibidir;

- Gaz türbini adası
- Buhar türbini binası
- Dizel jeneratör alanı
- İç ihtiyaç trafosu alanı
- Soğutma suyu pompa istasyonu
- Ana trafo alanı
- Soğutma kulesi
- Başlatma trafosu alanı
- Acil ihtiyaç trafosu alanı
- Sürekli emisyon ölçme merkezi
- Ham su tankı ve kuyu binaları
- Yangın suyu pompa istasyonu, atölye ve ambar binası
- Kimyasal su işleme tesisi
- Isı geri kazanımlı buhar üreticisi (HRSG) ve bacası
- Besleme suyu pompa istasyonu
- Kimyasal işleme merkezi
- Soğutma suyu boruları
- Gaz kompresör istasyonu
- Tesisi çevreleyen dış duvarlar
- 110 kV ana besleme hattı

- Yönetim ve güvenlik binaları
- Tahrik trafosu alanı
- Atık su işleme tesisi
- Hava kompresör istasyonu
- Buhar türbini drenaj tankı
- Numune alma sistemi
- N₂-manifolt alanı
- Gaz ölçüm istasyon alanı

6.1 Temel Operasyon Karakteristiği

Tesis, ısıtma sezonunda günlük 16 saat kojenerasyon modunda hem ısı hem de elektrik, kalan 8 saat ise kondens modunda sadece elektrik üretecek şekilde tasarlanmıştır. Tesisin belirli koşullardaki operasyon durumları Çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 Belirli koşullardaki operasyon parametreleri

Çevre hava sıcaklığı (°C)	+2 °C	+2 °C	+12 °C	+12 °C	+25°C	+42 °C	-25 °C
Bölgesel ısıtma gücü (MW _{isi})	160	0	65	0	0	0	160
Net elektrik gücü (MW _{el})	227.37	251.03	231.56	232.96	222.88	203.64	233.41
Yakıt miktarı (kg/s)	10.017	10.017	9.67	9.67	8.98	8.498	10.505
Isı tüketimi (kJ/kWh)	4580.0	7072.7	5778.5	7361.9	7142.8	7392.2	4730.6

Bu şartlar altında tesisin temel operasyon ve üretim parametreleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

- Yıllık çalışma süresi 8 300 saat,
- Yıllık kondens durumda çalışma süresi 5 600 saat,
- Yıllık kojenerasyon modunda çalışma süresi 2 700 saat,
- Bu operasyon sürelerinde beklenen üretim,

-Yıllık brüt elektrik üretimi 1 922 GWh,

-Yıllık net elektrik üretimi 1 835 GWh,

-Yıllık ısı üretimi 1 147 TJ

Genel olarak elektrik çıktısı, ısı üretimine ve gaz türbininde yanan havanın sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir.

Yıllık tahmini yakıt ve su tüketimleri ise, 277 700 t/yakıt ve 2 056 000 t/su olarak hesaplanmıştır.

6.2 Tesisi Oluşturan Sistemler

6.2.1 Gaz Türbini

Tesisin temel parçası olan gaz türbini, yakıt olarak doğal gaz yakmaktadır. Gaz türbini, nominal elektrik çıktısı 180 MW olan Alstom'un ürettiği GT13E2 tipi gaz türbinidir. Kendisini kanıtlamış bir ekipman serisi olan GT13E temel alınarak dizayn edilmiştir. Orjinal konseptin dışında bu tip, makinanın dışında yer alan ayrı bir yanma odası yerine daha düşük NOx üretimli dairesel EV yakıcı sistemine sahiptir. Bu değişiklik ile daha ekolojik bir yanma, doğal gazın enerjisinden daha fazla yararlanma ve türbine giren doğal gazın sıcaklığının uygun dağıtılması sağlanmıştır. Orjinal dizaydaki bu değişiklik ayrıca sıcak gas kısımlarının kontrol zamanlarının arasındaki operasyon sürelerini %50 oranında artmasına neden olmuştur.

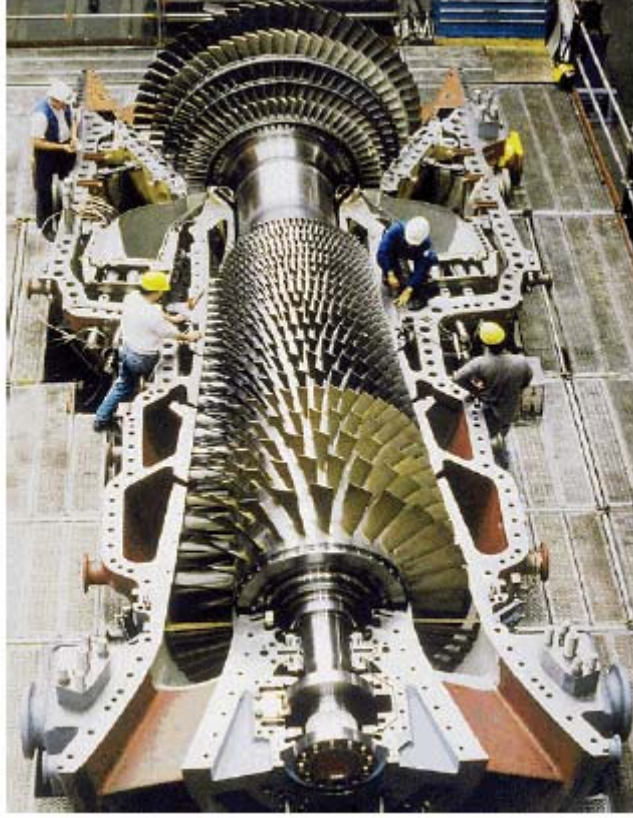
Gaz türbinli turbo jeneratör seti, tek yönlü gerçekleşen akış içinde yanma havası sıkıştırıcı aksiyal kompresörü de içerir. Kompresör ve gaz türbini aynı rotora sahip olup bu özellik bakım işlerini kolaylaştırmaktadır.

Turbo jeneratör seti sahra tipi olup, aynı zamanda ses izolasyonu da sağlayan ayrı bir yapı içerisinde bulunmaktadır.

GT13E2 performans değerleri aşağıdaki gibidir:

- Çıkış gücü (brüt) : 173.3 MW
- Verim (brüt) : % 36.6
- Egzost debisi : 537 kg/s

- Egzost sıcaklığı : 521°C
- NOx emisyon değeri : < 25



Gaz türbini rotor montaj çalışmasından bir görüntü

6.2.2 Buhar Türbini

Buhar türbinli turbo jeneratör seti, duble basınçlı buhar türbini, kapalı su çevrimi ile soğutulan hava soğutmalı senkronize jeneratör, yüzey yoğuşmalı borulu ısı değiştirici, bölgesel ısıtmada kullanılacak ısı değiştirici, çürük buhar sistemi, yağlama sistemi, yüksek basınçlı hidrolik düzenleyicisi, kontrol sistemi, koruyucu ekipmanlar ve diğer yardımcı ekipmanlardan oluşur.

Turbo jeneratör seti, tepkimeli kanatçıklı olup, genleşen buharı dikey ve aşağı doğrultuda kondensere gönderen yatay konumdadır.

Buhar türbini ana kondenseri, $\Phi 24 \times 0.7$ mm çapında paslanmaz boru demetlerinden oluşan, soğutma kulesi suyu ile soğuyan ve ısı transfer yüzeyi 4.811 m² olan çift geçişli tipindedir. Yayların üzerinde oturan kondenser boğaz adı verilen çelik bir plakadan yapılmış süperstrüktür yardımıyla türbininin egzost kısmına bağlanır. Kondenserin altında ise yoğuşan

suyun toplandığı sıcak kuyu adı verilen kısım mevcuttur.

Senkronize jeneratör sistemi gaz türbini veya buhar türbininden elde edilen mekanik enerjiyi birleşik şaft yardımıyla yüksek verimde elektrik aktif güce dönüştürür ve normal ve geçici operasyon zamanlarında genel ayar değerine mümkün olduğunca yakın bir terminal volt değerinde şebeke operasyon şartlarının öngördüğü elektrik reaktif gücü sağlar.

Jeneratörlerin güçleri bütün çevre sıcaklıklarında türbinlerin performanslarıyla eşleşecek şekilde seçilmiş olup gaz türbini jeneratörünün nominal kapasitesi 180 MW, buhar türbini jeneratörünün nominal kapasitesi 78 MW' dır.

6.2.3 Isı Geri Kazanımlı Buhar Jeneratörü

Santralde, birincil ısı kaynağı olarak gaz türbininin atık enerjisini kullanan doğal sirkülasyonlu yatay olarak dizayn edilmiş ALSTOM India marka kazan kullanılacaktır.

Kazana sıcak egzost gazları gaz türbini egzost çıkışına bağlanan bir kanal ile gelmektedir. Egzost gazları, kazanın ısı transfer bölgesine gelmeden önce yatay geçiş kanalı içerisinde yayıldıktan sonra dikey olarak yerleştirilmiş ısı transfer modüllerinden aksiyal akışla kazanın egzost plenum bölgesine gelir. Buradan, akış yukarı doğrultuya çevirilerek bacadan dışarı atılması sağlanır.

Egzost gazı kazan içerisinde sırasıyla geçtiği her bir modül ve işleyiş aşağıdaki gibidir.

- Yüksek basınç kızdırıcısı; yüksek basınç buhar dramındaki kuru ve doymuş buharı ısıtmak.
- Yüksek basınç buharlaştırıcısı; yüksek basınçlı buhar üretmek.
- Düşük basınç kızdırıcısı; düşük basınç buhar dramındaki kuru ve doymuş buharı ısıtmak.
- Yüksek sıcaklık ve yüksek basınçlı ekonomizer; sıcak suyu yüksek basınç buhar dramının doyma sıcaklığına kadar ısıtmak.
- Düşük basınç buharlaştırıcısı; düşük basınçlı buhar üretmek.
- Yüksek basınçlı ekonomizer; kazan besleme ve kondens sularını düşük basınç ekonomizeri ile paralel olarak düşük basınç buhar dramının doyma sıcaklığına kadar

ısıtmak.

- Düşük basınç kondens suyu ısıtıcısı

Kazan, gaz türbini ve kazan arası bağlantı kanalı, kızdırıcılar, buharlaştırıcılar, ekonomizerler, buhar dramları, baca, yürüme platformları ve merdivenler, besı suyu tankı ve kimyasal dozajlama sisteminden oluşmaktadır.

6.2.4 Soğutma Kulesi

Soğutma gücü 173 MW olan soğutma kulesi, fan tipi dört ayrı hücreye sahip olup kış sezonunda tesisin etrafında sis oluşturmıyacak ve donmaya neden olmayacak şekilde hybrid sistemle donatılmıştır. Her bir hücrede soğuyan su kulenin tabanında birikir ve sirkülasyon pompası ile buhar türbini kondenserine ve diğer yardımcı soğutma sistemlerinin ısı değıştiricilerine gider.

Kule yapısı ahşap, fanların difüzörleri lamine plastik, iç kısım ve damla tutucuları PVC ve kaplaması GRP (camla güçlendirmiş plastik) malzemeden oluşmaktadır.

Her bir hücre ayrı birer deluge sistem yangın suyu dağıtımına sahiptir.

6.2.5 Gaz Kompresörü

Entegre tahrik dişli santrifüj tip olan kompresörün dikey olarak ayrılan sarmal yapıları yatay olarak ayrılan dişli kutusuna bir adaptör sayesinde yerleştirilmiştir. Sarkık pervaneler pinyon şaftına yüksek operasyon güvenliği ve kolay kurulumunu sağlayan Hirth bağlantısıyla bağlanmaktadır

Kompresör dizayn parametreleri aşağıdaki gibidir:

Gaz Tipi.....	doğal gaz
Mol Ağırlığı.....	16.36 kg/kmol
Debi.....	39 000 kg/sa
Giriş sıcaklığı.....	15°C
Giriş basıncı.....	11.05 bar _a
Çıkış basıncı.....	29 bar _a

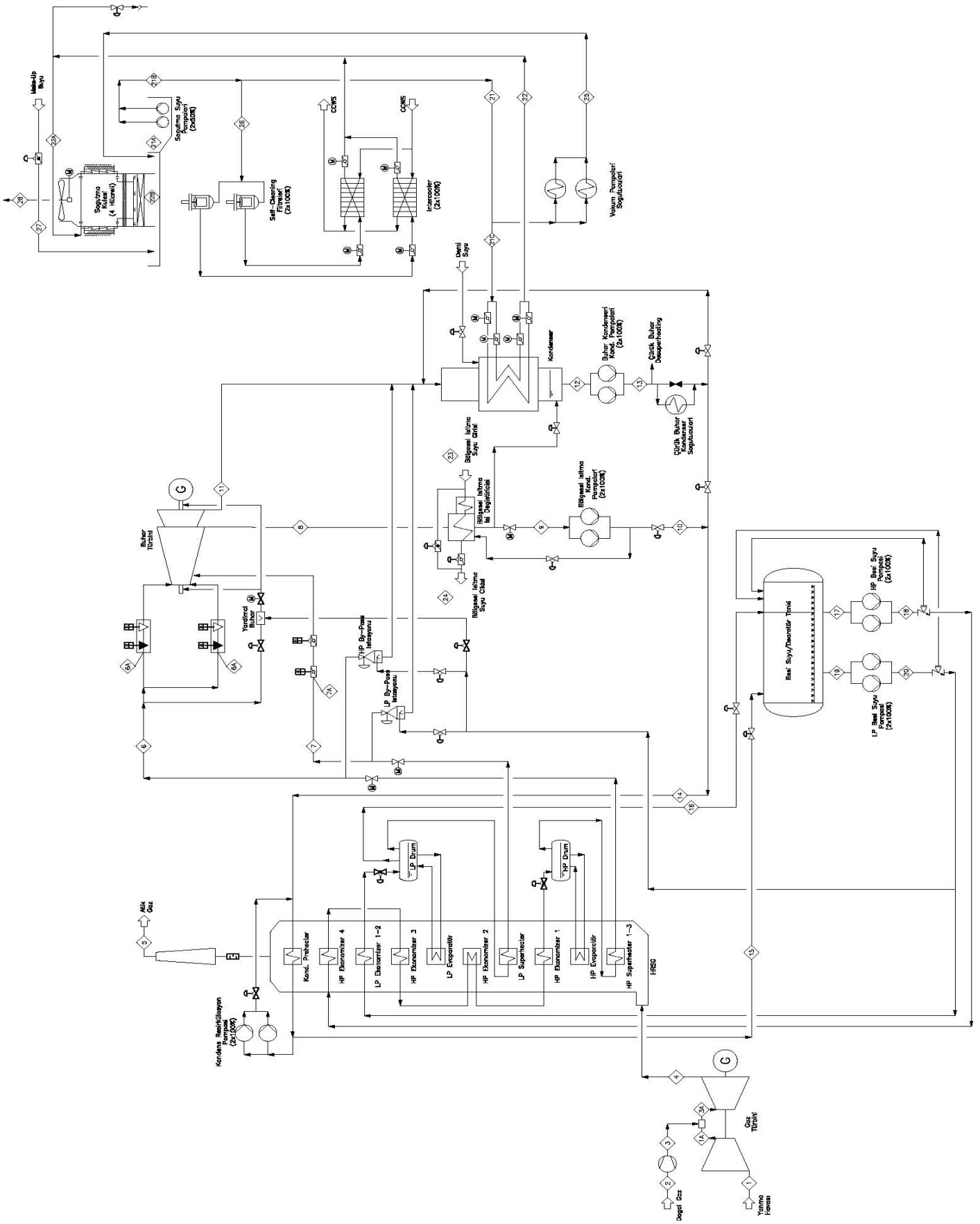
6.3 Tesisin Ekserji Analizi

Kombine çevrim kojenerasyon enerji santralinin genel akış şeması Şekil 6.1’de verildiği gibidir. Ekserji analiz hesaplamalarında kullanılacak diğer bilgiler ise aşağıdaki gibidir:

- Çevre sıcaklığı : 2 °C
- Bağıl Nem: % 60
- GT Yük Oranı: % 103
- Bölgesel Isıtma: 160 MW

Çizelge 6.2 Prosesteki akımların özellikleri

Akış	Debi (kg/s)	Basınç (bar _a)	Sıcaklık (°C)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kg.K)
1	555.53	0.99	2	275.50	5.6210
1A	555.53	13	311.7	591.40	5.6490
2	10.02	13	15	-35.76	-1.4320
3	10.02	29	113.9	191.40	-1.1640
3A	565.55	12.99	1100	142.28	8.1100
4	565.55	1.02	508	-583.25	8.1691
5	565.55	0.99	125.1	-1021.73	7.4099
6	61.29	78	491.7	3380.00	6.7120
6A	61.29	72.27	488.44	3380.00	6.7440
7	16.19	7.3	273.4	3002.00	7.1760
7A	16.19	6.8	272.26	3001.00	7.2070
8	69.1	0.85	94.99	2610.00	7.2590
9	69.1	0.85	64.93	271.80	0.8926
10	69.1	15.05	65.03	273.40	0.8930
11	8.38	0.02	16.5	2387.40	8.2490
12	8.38	0.02	16.5	69.20	0.2460
13	8.38	15.22	16.5	70.60	0.2457
14	77.48	6.3	62.5	262.06	0.8621
15	77.48	2.3	111.5	467.72	1.4350
16	1.79	8.43	172.6	2769.30	6.6410
17	61.29	1.9	118.51	497.39	1.5120
18	61.29	90.9	118.51	503.70	1.5040
19	17.98	1.9	118.51	497.39	1.5120
20	17.98	13.7	118.51	498.22	1.5110
21	2136.4	3.2	13.8	58.10	0.2067
21A	2285.03	0.99	13.8	57.99	0.2068
21B	2285.03	3.2	13.8	58.10	0.2067
21C	2069.2	3.2	13.8	58.10	0.2067
22	2069.2	2.6	16.05	67.60	0.2394
22A	2217.8	2.6	16.05	67.60	0.2394
22B	2210.5	0.99	13.8	57.99	0.2068
23	1583.33	9	60	251.90	0.8307
24	1583.33	9	90	377.60	1.1920
25	67.2	1.4	13.82	58.11	0.2070
26	148.6	1.8	13.2	55.56	0.1980
27	10.2	3.1	12.1	51.08	0.1819
28	7.3	0.99	2	8.50	0.0306



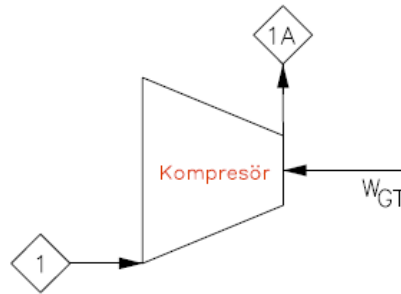
Şekil 6.1 Prosesin genel akış diyagramı

Ekserji analiz hesaplamalarında kullanılacak prosese ait debi, sıcaklık, basınç, entalpi ve entropi değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir. Ayrıca tesisin garanti edilen güçleri aşağıda verilmiştir.

- GT Brüt Gücü: 180.7 MW
- BT Brüt Gücü: 53.1 MW
- Tesis toplam Brüt Gücü: 233.8 MW
- Net Elektrik Çıktısı: 227.37 MW
- Net Isı Sarfıyatı: 7.824 kJ/kWh

6.3.1 Kompresör Ekserji Analizi

Basınçlı hava, Şekil 6.2’de görüldüğü gibi 1 noktasındaki şartlarda kuru hava olarak girip, kompresörde sıkıştırılarak 1A noktasındaki şartlarda yanma odasına girer.



Şekil 6.2 Kompresör akım şeması

Kompresör için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri ile ekserji verimi ve ekserji bozunumu bağıntıları:

$$m_1 = m_{1A} \quad (6.1)$$

$$E_1 + W_{GT} = E_{1A} \quad (6.2)$$

$$\Xi_1 + W_{GT} = \Xi_{1A} \quad (6.3)$$

$$\varepsilon = (\Xi_{1A} - \Xi_1) / W_{GT} \quad (6.4)$$

$$\Xi_T = \Xi_1 + W_{GT} - \Xi_{1A} \quad (6.5)$$

Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak elde edilen bulgular Çizelge 6.3’de verilmektedir.

Çizelge 6.3 Kompresör için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri

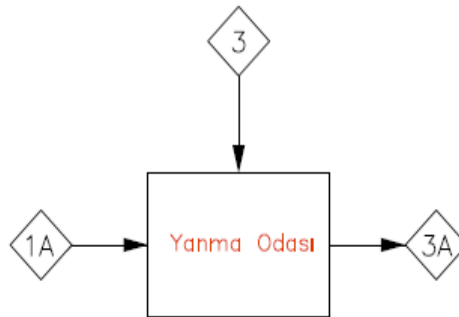
Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
1	555.53	153.05	0.00
W_{GT}		175.49	175.49
Toplam Giren	555.53	328.54	175.49

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
1A	555.53	328.54	170.28
Kayıp		0.00	5.21
Toplam Çıkan	555.53	328.54	175.49

Ekipman	Ekserji Verimi	Ekserji Bozunumu
Kompresör	0.97	5.21

6.3.2 Yanma Odası Ekserji Analizi

Yanma odasına 3 noktasındaki parametrelerde giren doğal gaz, kompresörden gelen 1A noktasındaki parametrelere sahip sıkıştırılmış hava ile yanarak 3A noktasındaki parametrelerde yanma odasından çıkmaktadır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3 Yanma odası akım şeması

Yanma odası için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri ile ekserji verimi ve ekserji bozunumu bağıntıları:

$$m_{1A} + m_3 = m_{3A} \quad (6.6)$$

$$E_{1A} + E_3 = E_{3A} \quad (6.7)$$

$$\Xi_{1A} + \Xi_3 = \Xi_{3A} \quad (6.8)$$

$$\varepsilon = \Xi_{3A} / (\Xi_{1A} + \Xi_3) \quad (6.9)$$

$$\Xi_T = \Xi_{1A} + \Xi_3 - \Xi_{3A} \quad (6.10)$$

Yanma odasında kullanılan yakıtın ve yanma sonucu oluşan yanma gazlarının mol kesri ve standart kimyasal ekserjileri Bejan'ın kimyasal ekserjiler tablosundaki model 1'e göre alınmıştır (Bejan,1996). Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak elde edilen bulgular Çizelge 6.4'de verilmektedir.

Çizelge 6.4 Yanma odası için kütle, enerji ve ekserji denklikleri

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
1A	555.53	328.54	170.28
3	10.02	1.92	520.26
Toplam Giren	565.55	330.46	690.54

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
3A	565.55	80.47	551,12
Kayıp		249.99	139.42
Toplam Çıkan	565.55	330.46	690.54

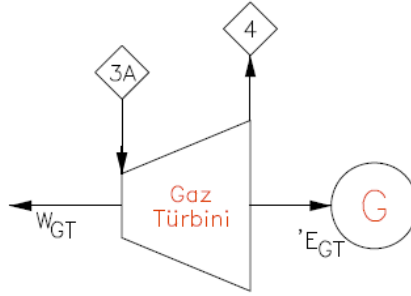
Ekipman	Ekserji Verimi	Ekserji Bozunumu
Yanma Odası	0.80	139.42

6.3.3 Gaz Türbini Ekserji Analizi

Gaz türbini, yanma odasından gelen basınçlı yanma gazları ile rotorun ve buna bağlı şaftın dönmesi sonucu mekanik güç (W_{GT}) ve elektrik üretir ($\dot{E}_{GT}$). Geri kalan yanma gazları 4 noktasındaki parametrelerde gaz türbinini terk eder (Şekil 6.4).

Gaz türbini için kütle, enerji ve ekserji denklikleri ile ekserji verimi ve ekserji bozunumu bağıntıları:

$$m_{3A} = m_4 \quad (6.11)$$



Şekil 6.4 Gaz türbini akım şeması

$$E_{3A} = E_4 + W_{GT} + 'E_{GT} \quad (6.12)$$

$$\Xi_{3A} = \Xi_4 + W_{GT} + 'E_{GT} \quad (6.13)$$

$$\varepsilon = (W_{GT} + 'E_{GT}) / (\Xi_{3A} - \Xi_4) \quad (6.14)$$

$$\Xi_T = \Xi_{3A} - (\Xi_4 + W_{GT} + 'E_{GT}) \quad (6.15)$$

Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak elde edilen bulgular Çizelge 6.5’de verilmektedir.

Çizelge 6.5 Gaz türbini için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri

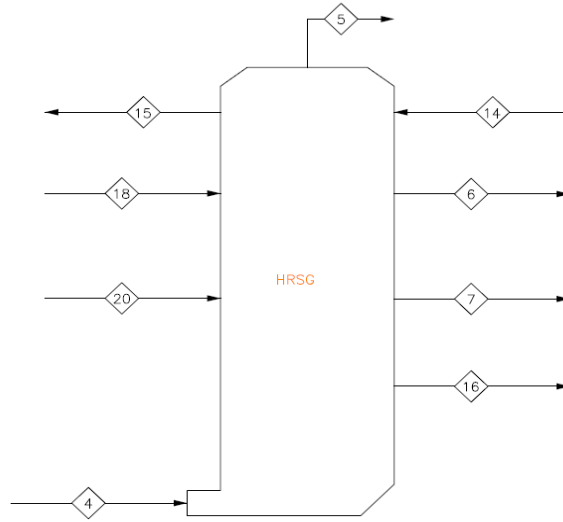
Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
3A	565.55	80.47	551.12
Toplam Giren	565.55	80.47	551.12

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
4	565.55	-329.86	130.83
W_{GT}		175.49	175.49
'E_{GT}		180.70	180.70
Kayıp		54.13	64.10
Toplam Çıkan	565.55	80.47	551.12

Ekipman	Ekserji Verimi	Ekserji Bozunumu
Gaz Türbini	0.85	64.10

6.3.4 Isı Geri Kazanımlı Buhar Üretici (HRSG) Ekserji Analizi

Gaz türbininden çıkan yanma gazı (4 noktası) yanma gazı kanalıyla HRSG'ye atılır. Burada yanma gazının sıcaklığı ile buhar türbinine gönderilen yüksek ve alçak basınçlı buhar üretilir. Kullanılan yanma gazı (5 noktası) atık olarak bacadan dışarı atılır (Şekil 6.5).



Şekil 6.5 Isı geri kazanımlı buhar üreticisi akım şeması

Isı geri kazanımlı buhar üreticisi için kütle, enerji ve ekserji denklikleri ile ekserji verimi ve ekserji bozunumu bağıntıları:

$$m_4 + m_{14} + m_{18} + m_{20} = m_5 + m_6 + m_7 + m_{15} + m_{16} \quad (6.16)$$

$$E_4 + E_{14} + E_{18} + E_{20} = E_5 + E_6 + E_7 + E_{15} + E_{16} \quad (6.17)$$

$$\Xi_4 + \Xi_{14} + \Xi_{18} + \Xi_{20} = \Xi_5 + \Xi_6 + \Xi_7 + \Xi_{15} + \Xi_{16} \quad (6.18)$$

$$\varepsilon = (\Xi_6 + \Xi_7 + \Xi_{15} + \Xi_{16} - \Xi_{14} - \Xi_{18} - \Xi_{20}) / (\Xi_4 - \Xi_5) \quad (6.19)$$

$$\Xi_T = \Xi_4 + \Xi_{14} + \Xi_{18} + \Xi_{20} - (\Xi_5 + \Xi_6 + \Xi_7 + \Xi_{15} + \Xi_{16}) \quad (6.20)$$

Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak elde edilen bulgular Çizelge 6.6'da verilmektedir.

6.3.5 Buhar Türbini Ekserji Analizi

Buhar türbinine 6A noktasındaki özelliklerde giren yüksek basınçlı buhar ile 7A noktasındaki

Çizelge 6.6 Isı geri kazanımlı buhar üreticisi için kütle, enerji ve ekserji denklemleri

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
4	565.55	-329.86	130.83
14	77.48	20.30	0.93
18	61.29	30.87	3.82
20	17.98	8.96	0.98
Toplam Giren	722.3	-269.72	136.56

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
5	565.55	-577.84	10.86
6	61.29	207.10	84.87
7	16.19	48.60	14.08
15	77.48	36.24	3.63
16	1.79	4.96	1.43
Kayıp		11.22	21.69
Toplam Çıkan	722.3	-269.72	136.56

Ekipman	Ekserji Verimi	Ekserji Bozunumu
HRSG	0.81	21.69

Buhar türbinine 6A noktasındaki özelliklerde giren yüksek basınçlı buhar ile 7A noktasındaki özelliklerde giren alçak basınçlı buhar tarafından jeneratör döndürülerek elektrik üretimi ($\dot{E}_{BT}$) sağlanır (Şekil 6.6). 8 noktasından çıkan buhar bölgesel ısıtma yoğuşturucusunu beslerken, 11 noktasından çıkan buhar ana yoğuşturucuya gider.

Buhar türbini için kütle, enerji ve ekserji denklemleri ile ekserji verimi ve ekserji bozunumu bağıntıları:

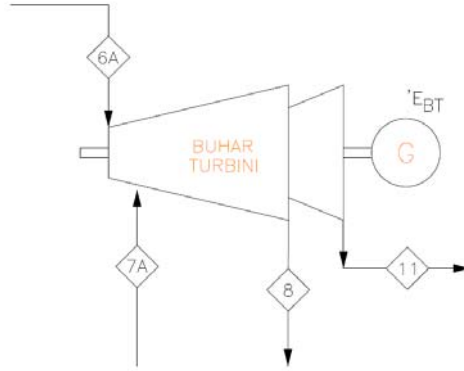
$$m_{6A} + m_{7A} = m_8 + m_{11} \quad (6.21)$$

$$E_{6A} + E_{7A} = E_8 + E_{11} + \dot{E}_{BT} \quad (6.22)$$

$$\Xi_{6A} + \Xi_{7A} = \Xi_8 + \Xi_{11} + \dot{E}_{BT} \quad (6.23)$$

$$\varepsilon = \dot{E}_{BT} / (\Xi_{6A} + \Xi_{7A} - \Xi_8 - \Xi_{11}) \quad (6.24)$$

$$\Xi_T = \Xi_{6A} + \Xi_{7A} - \Xi_8 - \Xi_{11} - \dot{E}_{BT} \quad (6.25)$$



Şekil 6.6 Buhar türbini akım şeması

Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak elde edilen bulgular Çizelge 6.7’de verilmektedir.

Çizelge 6.7 Buhar türbini için kütle, enerji ve ekserji denklikleri

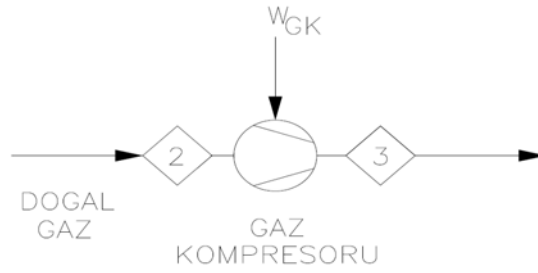
Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
6A	61.29	207.16	84.35
7A	16.19	48.59	13.91
Toplam Giren	77.48	255.75	98.26

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
8	69.10	180.35	31.28
11	8.38	20.01	-0.55
'E _{BT}		53.10	53.10
Kayıp		2.29	14.42
Toplam Çıkan	77.48	255.75	98.26

Ekipman	Ekserji Verimi	Ekserji Bozunumu
Buhar Türbini	0.79	14.42

6.3.6 Gaz Kompresörü Ekserji Analizi

Doğal gaz, Şekil 6.7’de görüldüğü gibi 2 noktasındaki şartlarda gaz kompresörüne girip, 3 noktasındaki şartlarda kompresörü terk edip yanma odasına gider.



Şekil 6.7 Gaz kompresörü akım şeması

Gaz kompresörü için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri ile ekserji verimi ve ekserji bozunumu bağıntıları:

$$m_2 = m_3 \quad (6.26)$$

$$E_2 + W_{GK} = E_3 \quad (6.27)$$

$$\Xi_2 + W_{GK} = \Xi_3 \quad (6.28)$$

$$\varepsilon = (\Xi_3 - \Xi_2) / W_{GK} \quad (6.29)$$

$$\Xi_T = \Xi_2 + W_{GK} - \Xi_3 \quad (6.30)$$

Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak elde edilen bulgular Çizelge 6.8’de verilmektedir.

Çizelge 6.8 Gaz kompresörü için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
2	10.02	-0.36	518.78
W_{GK}		2.80	2.80
Toplam Giren	10.02	2.44	521.59

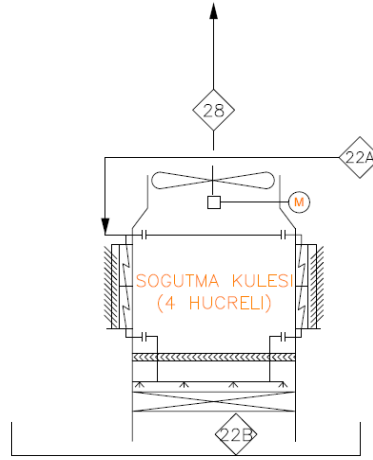
Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
3	10.02	1.92	520.263
Kayıp		0.52	1.32
Toplam Çıkan	10.02	2.44	521.59

Ekipman	Ekserji Verimi	Ekserji Bozunumu
Gaz Kompresörü	0.53	1.32

6.3.7 Soğutma Kulesi Ekserji Analizi

Kondenserden çıkan su, Şekil 6.8’de görüldüğü gibi 22A noktasındaki şartlarda soğutma kulesine girip, 22B noktasındaki şartlarda soğutma kulesi su havuzuna gider. 28 noktasındaki parametrelerde bir miktar su buharlaşarak havaya karışır.

Soğutma kulesi için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri ile ekserji verimi ve ekserji bozunumu bağıntıları:



Şekil 6.8 Soğutma kulesi akım şeması

$$m_{22A} = m_{22B} + m_{28} \quad (6.31)$$

$$E_{22A} + W_{CT} = E_{22B} + E_{28} \quad (6.32)$$

$$\Xi_{22A} + W_{CT} = \Xi_{22B} + \Xi_{28} \quad (6.33)$$

$$\varepsilon = (\Xi_{22B} + \Xi_{28} - \Xi_{22A}) / W_{CT} \quad (6.34)$$

$$\Xi_T = \Xi_{22A} + W_{CT} - \Xi_{22B} - \Xi_{28} \quad (6.35)$$

Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak elde edilen bulgular Çizelge 6.9’da verilmektedir.

Çizelge 6.9 Soğutma kulesi için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri

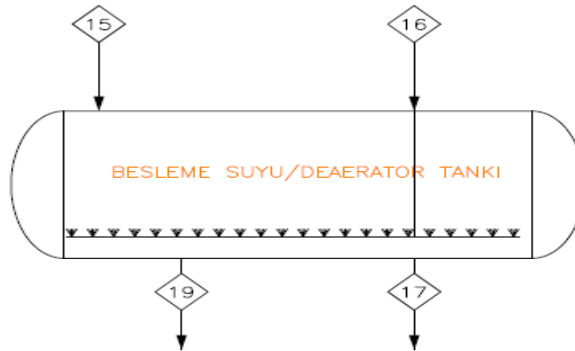
Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
22A	2217.8	149.92	7.17
W_{CT}		0.64	0.64
Toplam Giren	2217.8	150.56	7.81

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
22B	2210.5	128.19	7.39
28	7.3	0.03	0.05
Kayıp		22.35	0.37
Toplam Çıkan	2217.8	150.56	7.81

Ekipman	Ekserji Verimi	Ekserji Bozunumu
Soğutma Kulesi	0.41	0.37

6.3.8 Dearatör Ekserji Analizi

Dearatöre kazandan gelen 15 noktasındaki parametrelere sahip su ile 16 noktasındaki parametrelere sahip alçak basınçlı su buharı içeride karışıp 17 ve 19 noktalarındaki parametrelere sahip sıcak su olarak yüksek ve alçak basınç besleme suyu pompalarına girer (Şekil 6.9).



Şekil 6.9 Dearatör akım şeması

Dearatör için kütle, enerji ve ekserji denklikleri ile ekserji verimi ve ekserji bozunumu bağıntıları:

$$m_{15} + m_{16} = m_{17} + m_{19} \quad (6.36)$$

$$E_{15} + E_{16} = E_{17} + E_{19} \quad (6.37)$$

$$\Xi_{15} + \Xi_{16} = \Xi_{17} + \Xi_{19} \quad (6.38)$$

$$\varepsilon = (\Xi_{17} + \Xi_{19}) / (\Xi_{15} + \Xi_{16}) \quad (6.39)$$

$$\Xi_T = \Xi_{15} + \Xi_{16} - \Xi_{17} - \Xi_{19} \quad (6.40)$$

Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak elde edilen bulgular Çizelge 6.10’da verilmektedir.

Çizelge 6.10 Dearatör için kütle, enerji ve ekserji denklikleri

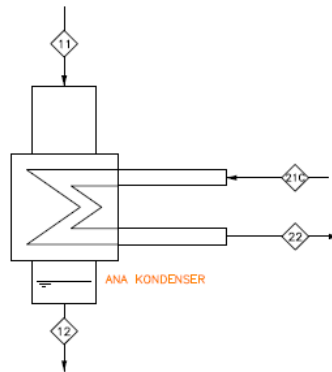
Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
15	77.48	36.24	3.63
16	1.79	4.96	1.43
Toplam Giren	79.27	41.20	5.06

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
17	61.29	30.49	3.285
19	17.98	8.94	0.964
Kayıp		1.77	0.81
Toplam Çıkan	79.27	41.20	5.06

Ekipman	Ekserji Verimi	Ekserji Bozunumu
Dearatör	0.84	0.81

6.3.9 Ana KondenserEkserji Analizi

Ana kondensere (Şekil 10), sıcak akım olarak 11 noktasındaki parametrelerde buhar türbininden gelen çürük buhar ve soğuk akım olarak 21C noktasındaki parametrelerde soğutma kulesinden gelen soğuk su girerken 12 ve 22 noktalarındaki parametrelere sahip su olarak kondenseri terk eder.



Şekil 6.10 Ana kondenser akım şeması

Ana kondenser için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri ile ekserji verimi ve ekserji bozunumu bağıntıları:

$$m_{11} + m_{21C} = m_{12} + m_{22} \quad (6.41)$$

$$E_{11} + E_{21C} = E_{12} + E_{22} \quad (6.42)$$

$$\Xi_{11} + \Xi_{21C} = \Xi_{12} + \Xi_{22} \quad (6.43)$$

$$\varepsilon = (\Xi_{22} - \Xi_{21C}) / (\Xi_{11} - \Xi_{12}) \quad (6.44)$$

$$\Xi_T = \Xi_{11} + \Xi_{21C} - \Xi_{12} - \Xi_{22} \quad (6.45)$$

Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak elde edilen bulgular Çizelge 6.11’de verilmektedir.

Çizelge 6.11 Ana kondenser için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri

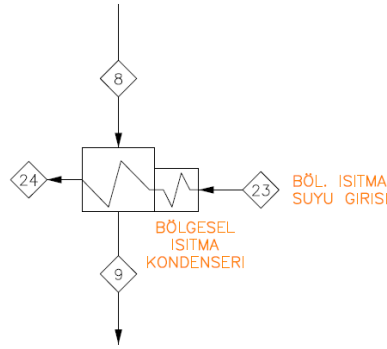
Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
11	8.38	20.01	-0.54
21C	2069.20	120.22	7.20
Toplam Giren	2077.58	140.23	6.66

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
12	8.38	0.58	0.02
22	2069.20	139.88	6.69
Kayıp		-0.23	-0.05
Toplam Çıkan	2077.58	140.23	6.66

Ekipman	Ekserji Verimi	Ekserji Bozunumu
Ana Kondenser	0.91	-0.05

6.3.10 Bölgesel Isıtma Kondenseri Ekserji Analizi

Bölgesel ısıtma kondenserine (Şekil 6.11), sıcak akım olarak 8 noktasındaki parametrelerde buhar türbininden gelen ara buhar ve soğuk akım olarak 23 noktasındaki parametrelerde bölgesel ısıtmada kullanılan soğuk su girerken 9 ve 24 noktalarındaki parametrelere sahip su olarak kondenseri terk eder.



Şekil 6.11 Bölgesel ısıtma kondenseri akım şeması

Bölgesel ısıtma kondenseri için kütle, enerji ve ekserji denklıkları ile ekserji verimi ve ekserji bozunumu bağıntıları:

$$m_8 + m_{23} = m_9 + m_{24} \quad (6.46)$$

$$E_8 + E_{23} = E_9 + E_{24} \quad (6.47)$$

$$\Xi_8 + \Xi_{23} = \Xi_9 + \Xi_{24} \quad (6.48)$$

$$\varepsilon = (\Xi_{24} - \Xi_{23}) / (\Xi_8 - \Xi_9) \quad (6.49)$$

$$\Xi_T = \Xi_8 + \Xi_{23} - \Xi_9 - \Xi_{24} \quad (6.50)$$

Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak elde edilen bulgular Çizelge 6.12’de verilmektedir.

Çizelge 6.12 Soğutma kulseyi için kütle, enerji ve ekserji denklıkları

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
11	69.1	180.35	31.28
21	1583.33	398.84	17.79
Toplam Giren	1652.43	579.19	49.07

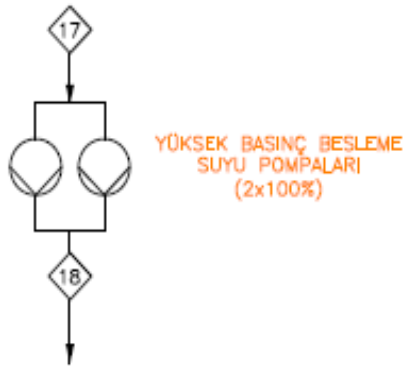
Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
12	69.1	18.78	0.88
22	1583.33	597.87	46.26
Kayıp		-37.45	1.94
Toplam Çıkan	1652.43	579.19	49.07

Ekipman	Ekserji Verimi	Ekserji Bozunumu
Bölg. Isıt. Kondenseri	0.94	1.94

6.3.11 Pompaların Ekserji Analizi

6.3.11.1 Yüksek Basınç Besleme Suyu Pompası Ekserji Analizi

Dearatörden gelen sıcak su, Şekil 6.12’de görüldüğü gibi 17 noktasındaki şartlarda pompaya girip, 18 noktasındaki şartlarda kazanın yüksek basınç ekonomizerine girer.



Şekil 6.12 Yüksek basınç besleme suyu pompası akım şeması

Yüksek basınç besleme suyu pompası için kütle, enerji ve ekserji denklikleri ile ekserji verimi ve ekserji bozunumu bağıntıları:

$$m_{17} = m_{18} \quad (6.51)$$

$$E_{17} + W_{HP} = E_{18} \quad (6.52)$$

$$\Xi_{17} + W_{HP} = \Xi_{18} \quad (6.53)$$

$$\varepsilon = (\Xi_{18} - \Xi_{17}) / W_{HP} \quad (6.54)$$

$$\Xi_T = \Xi_{17} + W_{HP} - \Xi_{18} \quad (6.55)$$

Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak elde edilen bulgular Çizelge 6.13’de verilmektedir.

Çizelge 6.13 Yüksek basınç besleme suyu pompası kütle, enerji ve ekserji denklilikleri

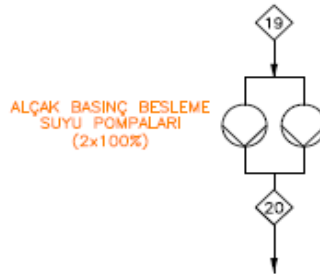
Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
17	61.3	30.49	3.28
W_{HP}		1.20	1.20
Toplam Giren	61.3	31.69	4.48

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
18	61.3	30.87	3.82
Kayıp		0.81	0.67
Toplam Çıkan	61.3	31.69	4.48

Ekipman	Ekserji Verimi	Ekserji Bozunumu
Yük. Bas. Bes. Suyu Pompası	0.44	0.67

6.3.11.2 Alçak Basınç Besleme Suyu Pompası Ekserji Analizi

Dearatörden gelen sıcak su, Şekil 6.13’de görüldüğü gibi 19 noktasındaki şartlarda pompaya girip, 20 noktasındaki şartlarda kazanın alçak basınç ekonomizerine girer.



Şekil 6.13 Alçak basınç besleme suyu pompası akım şeması

Alçak basınç besleme suyu pompası kütle, enerji ve ekserji denklilikleri ile ekserji verimi ve ekserji bozunumu bağıntıları:

$$m_{19} = m_{20} \quad (6.56)$$

$$E_{19} + W_{LP} = E_{20} \quad (6.57)$$

$$\Xi_{19} + W_{LP} = \Xi_{20} \quad (6.58)$$

$$\varepsilon = (\Xi_{20} - \Xi_{19}) / W_{LP} \quad (6.59)$$

$$\Xi_T = \Xi_{19} + W_{LP} - \Xi_{20} \quad (6.60)$$

Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak elde edilen bulgular Çizelge 6.14’de verilmektedir.

Çizelge 6.14 Alçak basınç besleme suyu pompası için kütle, enerji ve ekserji denklikleri

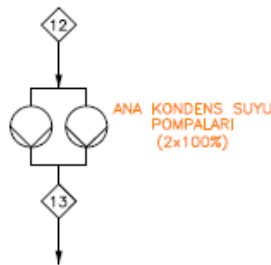
Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
19	17.98	8.94	0.96
W_{LP}		0.08	0.08
Toplam Giren	17.98	9.02	1.04

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
20	17.98	8.96	0.98
Kayıp		0.06	0.05
Toplam Çıkan	17.98	9.02	1.04

Ekipman	Ekserji Verimi	Ekserji Bozunumu
Alç. Bas. Bes. Suyu Pompası	0.27	0.05

6.3.11.3 Ana Kondens Suyu Pompası Ekserji Analizi

Ana kondenserde yoğuşan su, Şekil 6.14’de görüldüğü gibi 12 noktasındaki şartlarda pompaya girip, 13 noktasındaki şartlarda kazanın kondens suyu önısıtıcı kısmına girer.



Şekil 6.14 Ana kondens suyu pompası akım şeması

Ana kondens suyu pompası için kütle, enerji ve ekserji denklikleri ile ekserji verimi ve ekserji

bozunumu bağıntıları:

$$m_{12} = m_{13} \quad (6.61)$$

$$E_{12} + W_{CP} = E_{13} \quad (6.62)$$

$$\Xi_{12} + W_{CP} = \Xi_{13} \quad (6.63)$$

$$\varepsilon = (\Xi_{13} - \Xi_{12}) / W_{CP} \quad (6.64)$$

$$\Xi_T = \Xi_{12} + W_{CP} - \Xi_{13} \quad (6.65)$$

Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak elde edilen bulgular Çizelge 6.15’de verilmektedir.

Çizelge 6.15 Ana kondens suyu pompası için kütle, enerji ve ekserji denklikleri

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
12	8.38	0.58	0.024
W_{CP}		0.16	0.16
Toplam Giren	8.38	0.74	0.18

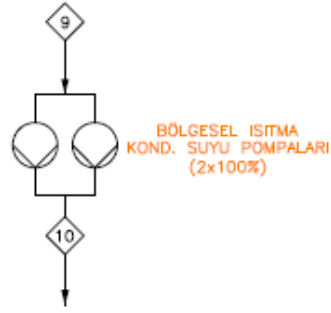
Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
13	8.38	0.59	0.03
Kayıp		0.15	0.15
Toplam Çıkan	8.38	0.74	0.18

Ekipman	Ekserji Verimi	Ekserji Bozunumu
Ana Kond. Suyu Pompası	0.08	0.15

6.3.11.4 Bölgesel Isıtma Kondens Suyu Pompası Ekserji Analizi

Bölgesel ısıtma kondenserinde yoğuşan su, Şekil 6.15’de görüldüğü gibi 9 noktasındaki şartlarda pompaya girip, 10 noktasındaki şartlarda kazanın kondens suyu önısıtıcı kısmına girer.

Bölgesel ısıtma kondens suyu pompası için kütle, enerji ve ekserji denklikleri ile ekserji verimi ve ekserji bozunumu bağıntıları:



Şekil 6.15 Bölgesel ısıtma kondens suyu pompası akım şeması

$$m_9 = m_{10} \quad (6.66)$$

$$E_9 + W_{DP} = E_{10} \quad (6.67)$$

$$\Xi_9 + W_{DP} = \Xi_{10} \quad (6.68)$$

$$\varepsilon = (\Xi_{10} - \Xi_9) / W_{DP} \quad (6.69)$$

$$\Xi_T = \Xi_9 + W_{DP} - \Xi_{10} \quad (6.70)$$

Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak elde edilen bulgular Çizelge 6.16’da verilmektedir.

Çizelge 6.16 Bölgesel ısıtma kondens suyu pompası için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri

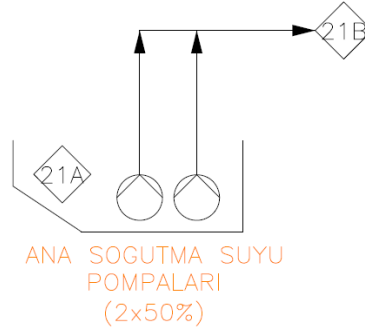
Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
9	69.1	18.78	0.88
W_{DP}		0.16	0.16
Toplam Giren	69.1	18.94	1.04

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
10	69.1	18.89	0.98
Kayıp		0.05	0.06
Toplam Çıkan	69.1	18.94	1.04

Ekipman	Ekserji Verimi	Ekserji Bozunumu
Böl. Isıt. Kond. Suyu Pompası	0.64	0.06

6.3.11.5 Ana Soğutma Suyu Pompası Ekserji Analizi

Soğutma kulesi su havuzundan gelen su, Şekil 6.16’da görüldüğü gibi 21A noktasındaki şartlarda pompaya girip, 21B noktasındaki şartlarda ana kondensere gider.



Şekil 6.16 Ana soğutma suyu pompası akım şeması

Ana soğutma suyu pompası için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri ile ekserji verimi ve ekserji bozunumu bağıntıları:

Çizelge 6.17 Ana soğutma suyu pompası için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
21A	2285.0	132.51	7.64
W_{WP}		0.40	0.40
Toplam Giren	2285.0	132.91	8.04

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
21B	2285.0	132.76	7.955
Kayıp		0.15	0.08
Toplam Çıkan	2285.0	132.91	8.04

Ekipman	Ekserji Verimi	Ekserji Bozunumu
A. Soğ. Suyu Pompası	0.80	0.08

$$m_{21A} = m_{21B} \quad (6.71)$$

$$E_{21A} + W_{WP} = E_{21B} \quad (6.72)$$

$$\Xi_{21A} + W_{WP} = \Xi_{21B} \quad (6.73)$$

$$\varepsilon = (\Xi_{21B} - \Xi_{21A}) / W_{WP} \quad (6.74)$$

$$\Xi_T = \Xi_{21A} + W_{WP} - \Xi_{21B} \quad (6.75)$$

Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak elde edilen bulgular Çizelge 6.17’de verilmektedir.

6.3.12 Tesisin Genel Ekserji Verimi

Tesisin genel ekserji verimi hesaplamasında sistemin sınırları belirlenip sisteme giren ve çıkan noktalar tespit edilmiştir. Tesisin yararlanma oranı ve termik verimi de aynı şekilde hesaplanarak genel ekserji verimi ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Tesisin bütünü için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri ile ekserji verimi ve ekserji bozunumu bağıntıları:

$$m_1 + m_2 + m_{21C} + m_{23} = m_5 + m_{22} + m_{24} \quad (6.76)$$

$$E_1 + E_2 + E_{21C} + E_{23} = E_5 + E_{22} + E_{24} + 'E_{GT} + 'E_{BT} \quad (6.77)$$

$$\Xi_1 + \Xi_2 + \Xi_{21C} + \Xi_{23} = \Xi_5 + \Xi_{22} + \Xi_{24} + 'E_{GT} + 'E_{BT} \quad (6.78)$$

$$\varepsilon = (E_{22} + E_{24} + 'E_{GT} + 'E_{BT}) / (\Xi_1 + \Xi_2 + \Xi_{21C} + \Xi_{23} - \Xi_5) \quad (6.79)$$

$$\Xi_T = (\Xi_1 + \Xi_2 + \Xi_{21C} + \Xi_{23}) - (E_5 + E_{22} + E_{24} + 'E_{GT} + 'E_{BT}) \quad (6.80)$$

Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak elde edilen bulgular Çizelge 6.18’de verilmektedir.

Tesisin genel ekserji verimi ($\varepsilon = 0.54$) %54, tesisin toplam ekserji bozunumu miktarı (Ξ_T) ise 246.17 Mwolarak hesaplanmıştır.

Ayrıca tesisin genel termik verimi (6.81) ve yararlanma oranı (6.82) bağıntıları:

$$\eta_T = ('E_{GT} + 'E_{BT}) / (m_2 \times H_u) \quad (6.81)$$

$$EYO = ('E_{GT} + 'E_{BT} + Q_t) / (m_2 \times H_u) \quad (6.82)$$

Bu bağıntılar sonucunda bulunan tesisin genel termik verimi ve yararlanma oranı miktarları:

$$\eta_T = \%47.4$$

$$EYO = \%79.8$$

Çizelge 6.18 Tesisin genel kütle, enerji ve ekserji denklilikleri

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
1	555.53	153.05	0.000
2	10.02	-0.36	518.79
21C	2069.2	120.22	7.20
23	1583.33	398.84	17.79
Toplam Giren	4218.08	671.75	543.78

Akış	Debi (kg/s)	Enerji (MW)	Ekserji (MW)
5	565.55	-577.84	10.864
22	2069.2	139.88	6.688
24	1583.33	597.87	46.256
'E _{GT}		180.70	180.70
'E _{BT}		53.10	53.100
Kayıp		278.04	246.17
Toplam Çıkan	4218.08	671.75	543.78

Ekipman	Ekserji Verimi	Ekserji Bozunumu
Tesis	0.54	246.17

6.4 Tesisin Ekonomik Analizi

Bir termal projenin tasarımının başarıyla tamamlanabilmesi, mühendislik ekonomisi yöntemlerini kullanarak yapılan ekonomik, teknolojik ve yasal koşulları göz önünde bulunduran tahmin ve varsayımlarla belirlenen projeye ait önemli maliyetlerin değerlendirilmesiyle mümkündür (Bejan, 1996). Bu bölümde projeye ait toplam yatırım maliyeti ve enflasyon, maliyet artışı, belirli bir değere getirilmiş maliyet, amortisman, vergiler ve santral finansmanı için gerçek varsayımlar altında son ürünlerin maliyetleri Bejan'ın kitabındaki hesap yöntemi referans alınarak toplam gelir gereksinimi yöntemi ile hesaplanacaktır.

Çizelge 6.19'da teze konu olan kombine çevrim kojenerasyon tesisine ait toplam yatırım maliyetini oluşturan kalemlerin ayrıntıları verilmiştir.

Bu tabloya göre tesisin sabit sermaye yatırım maliyeti 126,2 milyon Avro iken bu tutardan arazi maliyetinin çıkarılmasıyla bulunan tesis içi servislerin maliyeti ise 118,2 milyon

Avro'dur.

Çizelge 6.19 Tesise ait toplam yatırım maliyeti (bütün maliyetler “€” olarak verilmiştir.)

1	Sabit Sermaye Yatırımı	
A.	Doğrudan Maliyet	
1	Yerinde Malivet	
	Satın alınan ekipman malivetleri	
	Kompresör	15,392,787
	Yanma Odası	1,392,975
	Gaz Turbini	15,409,271
	Isı Geri kazanımlı Buhar Üreticisi	11,815,000
	Buhar Turbini	13,865,752
	Gaz Kompresörü	2,162,056
	Soğutma Kulesi	2,334,535
	Dearator	302,000
	Ana Kondenser	1,721,362
	Bölgesel Isıtma Kondenseri	662,062
	Yüksek Basınc Besleme Suyu Pompası	573,716
	Alçak Basınc Besleme Suyu Pompası	12,036
	Ana Kondens Suyu Pompası	132,412
	Bölgesel Isıtma Kondens Suyu Pompası	132,412
	Ana Soğutma Suyu Pompası	270,810
	Diğer Ekipmanlar	2,716,756
	Satın Alınan Ekipman Maliyetleri Toplamı (PEC)	68,895,942
	Satın alınan ekipmanların montajı	9,339,659
	Borulama	1,076,814
	Enstrumentasyon ve kontrolleri	1,678,562
	Elektriksel ekipmanlar ve gerekli malzemeler	9,206,168
	Yerinde Malivetlerin Toplamı	90,197,145
2	Yerinde Olmavan Malivetler	
	Arazi	8,000,000
	İnsai binalar, Celik işleri.. etc.	6,536,892
	Hizmet servisleri	2,926,571
	Yerinde Olmavan Malivetlerin Toplamı	17,463,463
	Doğrudan Maliyetlerin ToPlamı	107,660,608
B	Doğrudan Olmavan Maliyetler	
	Mühendislik ve supervizyon	8,776,560
	İnsai malivetler ve kontraktör karı	7,321,683
	Toplam	16,098,243
	Beklenmedik durumlar	2,414,736
	Doğrudan Olmavan Maliyetlerin Toplamı	18,512,979
	Sabit Sermaye Yatırımı Toplamı	126,173,587
2	Diğer Harcamalar	
	Devreve alma maliveti	3,823,000
	İşletme sermayesi	16,507,000
	İnsaat süresince fonlar için kullanılan ödenek	13,108,155
	Diğer Harcamaların Toplamı	33,438,155
	Yatırım Maliyeti Toplamı	159,611,742

Çizelge 6.20’de kombine çevrim kojenerasyon tesisi için toplam gelir gereksinimi hesaplamasında kullanılacak parametreler ve tahminler verilmiştir.

Çizelge 6.19 ve 6.20’ de verilen maliyet değerleri 2006 yılı için Euro olarak ifade edilmiştir. Yakıt hariç bütün maliyetler genel enflasyon ve eskalasyon oranlarında (1a ve 1b) artacağı

varsayılmıştır. Yakıt maliyeti artışı ise çizelgenin 1c maddesindeki oranda olacağı düşünülmüştür.

Çizelge 6.20 Toplam gelir gereksinimi hesaplamasında kullanılacak parametreler ve tahminler

Parametreler			
1a	Genel enflasyon oranı (2006-2032) (%)		3.5
b	Eskalasyon oranı (yakıt hariç bütün maliyetleri için) (2006-2032) (%)		7.7
c	Eskalasyon oranı (yakıt için) (2006-2032) (%)		8.7
2a	Tesisin dizayn ve inşaatının başlama tarihi		2006
b	İşletmeye başlama tarihi (Ticari olarak)		2008
3a	Tesisin ekonomik ömrü (Yıl)		20
b	Vergi amaçlı tesisin ömrü (Yıl)		15
4	Tesisin finansman oranları ve ana para geri dönüşümü:		
	Finansman tipi	Ortak Sermaye	İmtiyazlı Senet
	Finansman oranı (%)	35	15
	Yıllık geri dönüşüm (%)	15	11.7
	Paranın ortalama maliyeti (%)		12
5a	Toplam gelir vergisi oranı (2006-2032) (%)		38
b	Emlak vergisi oranı (2006-2032) (2007 sonunda tesis içi servislerin % si)		1.5
c	Sigorta oranı (2006-2032) 2007 sonunda tesis içi servislerin % si)		0.5
6	Kapasite faktörü (%)		100
7	İşletme ve bakım için gerekli olan işçi sayısı		20
8	Yıllık iş gücü maliyeti (10 ⁶ €)		0.5
9	Yıllık sabit işletme ve bakım maliyetleri (10 ⁶ €)		2
10	Yıllık değişken işletme ve bakım maliyetleri tam kapasitede		0
11	Yakıt birim maliyeti (€/GJ-LVH)		4.56
12	Tesisin dizayn ve inşaat işlerinin maliyetinin yıllık tahsili (%)		
	2006	59,086,793.50	50
	2007	35,452,076.10	30
	2008	23,634,717.40	20

Projenin dizaynı ve inşaat işlerinin başlama tarihi Ocak 2006 olup 2 senede bitirilmesi öngörülmüştür. Tesisin ekonomik ömrü 20 yıl olup Ocak 2008' den Aralık 2027'ye kadardır. Vergi için sistem ömrü 15 yıl alınmıştır. Ayrıca sistemin ömrü bittiğinde söküm bedeli hurda bedeline eşit olacağı düşünülmüştür

Sistem %95 kapasitede çalışacağı varsayılmıştır ki bu da yıllık 8300 saat çalışacaktır. 20 işçi işletme ve bakım için düşünülmüş olup yıllık 500 000 € işçilik gideri olacağı hesaplanmıştır. Yıllık sabit ve değişken işletme ve bakım giderleri 2 000 000 € olarak düşünülmüştür. Bütün

bu maliyetler 2006 yılına göre verildiğinden yıllık eskalasyon oranında artırılarak 2008 yılı fiyatları hesaplanmıştır. Eskale edilmiş yıllık sabit ve değişken işletme ve bakım maliyetleri 2320 000 € olarak bulunur.

Doğal gaz birim maliyeti 4,56 €/GJ-LHV olarak verilmiştir. Doğal gazın alt ısı değeri (LHV) 49205 kJ/kg, debisi 10,02 kg/s olduğundan yıllık yakıt maliyeti:

$$FC = (4,56 \text{ €/GJ}) (49205 \text{ kJ/kg}) (10,02 \text{ kg/s}) (8300 \text{ h/yıl}) (3600 \text{ s/h})$$

$$FC = 67\,234\,000 \text{ €/yıl (2006 yılı için)}$$

olarak hesaplanır. Ticari işletmenin ilk yılı olan 2008 yılı için bu tutar yakıt için olan yıllık eskalasyon oranında artırılır ve aşağıdaki değer bulunur.

$$FC = 79\,442\,000 \text{ €/yıl (2008 yılı için)}$$

Yakıt ve işletme ve bakım maliyetleri hesaplandıktan sonra devreye alma maliyeti (SUC) ile işletme sermayesini (WC) tahmin edebiliriz. Devreye alma maliyeti, bir aylık sabit işletme ve bakım masrafı, bir hafta tam kapasitede çalışmaya yetecek doğal gaz masrafı ve tesis içi servis maliyetlerinin %2 sinin toplamından oluşur.

$$SUC = (2\,000\,000 / 12) + (67\,234\,000 / 52) + (0,02 \times 118\,173\,000)$$

$$SUC = 3\,823\,000 \text{ € (2006 yılı için)}$$

Bu tutar 2007 yılına göre eskale edilir ve sonuç aşağıdaki gibi bulunur.

$$SUC = 4\,117\,000 \text{ € (2007 yılı için)}$$

Buna benzer olarak işletme sermayesi hesaplanır. İşletme sermayesi, 2 aylık yakıt masrafı, 3 aylık işçilik gideri ve diğer ihtimaller göz önüne alınarak bu ikisinin toplamının % 25 i toplanarak bulunur.

$$WC = [(69\,234\,000 / 6) + (500\,000 / 4)] * (1,25)$$

$$WC = 16\,507\,000 \text{ € (2006 yılı için)}$$

Eskalasyon sonrası işletme sermayesi,

$$WC = 17\,943\,000 \text{ € (2007 yılı için)}$$

olarak bulunur.

Tesis içi servislerin maliyeti 118,2 milyon € olarak belirlenmişti. Çizelge 6.20' de yer alan 12. maddeye göre bu tutarın %50' si 2006 yılı için, %30' u 2007 yılı için ve geri kalan kısmı 2008 yılı için eskalasyon hesabı yapılır. Aynı çizelgenin 4. maddesinde yer alan sistemin finansman oranları her bir yıl için bütün yatırım harcamalarına uygulanır. Çizelge 6.21' de özetlendiği gibi, inşaat sırasında kullanılan fonlar için ödenek, yatırımın geri dönüşü için kullanılan her bir finansman tipi için ayrı ayrı hesaplanır. Bu ödeneğin farklı finansman türleri için farklı hesaplanmasında ki sebep ortak sermaye ödeneğinin net amortismanına tabi bir yatırım değil de tesisin ekonomik ömrü sonunda kurtarılan bir yatırım olarak öngörülmesidir. Hesaplanan toplam ödenek tutarı 18 416 015 € dur. Çizelge 6.19'da verilen değer 2008 yılına göre hesaplanan değer % 12' lik ortalama iskonto değerinden 2006 yılına göre hesaplanmış halidir. İnşaat sırasında kullanılan fonlar için ödenek miktarı, tasarım ve inşaat sürelerinin ve yatırım getiri oranlarının artması ile birlikte toplam yatırımın artmasına neden olmaktadır.

Çizelge 6.21 İnşaat sırasında kullanılan fonlar için ödenek hesaplaması (x 10³ Avro)

Dizayn ve inşaat Yılı	Takvim Yılı	Tesis İçi Servislerin Maliyeti			Ortak Sermaye		İmtiyazlı Senet		Borç	
		2006 Avro	Eskalasyon Miktarı	Eskale Edilmiş Maliyet	Eskale Edilmiş Maliyet	Ödenek	Eskale Edilmiş Maliyet	Ödenek	Eskale Edilmiş Maliyet	Ödenek
1	2006	59,087	-	59,087	20,680	4,823	8,863	1,560	29,543	4,541
2	2007	35,452	2,729	38,182	13,364	967	5,727	326	19,091	931
3	2008	23,643	3,780	27,415	9,595	1,294	4,112	431	13,707	1,227
Toplam		118,173	6,510	124,683	43,639	7,083	18,702	2,357	62,342	6,699
Arazi için Ödenek				8,000		907		297		832
Devreye Alma için Ödenek				4,117		105		34		99
						8,096		2,688		7,632
Toplam Ödenek					18,416	(2008 yıl sonu)				
					13,108	(2006 yıl başı)				

Sonuç olarak, toplam amortismanlı ve amortismansız sermaye yatırım miktarlarını, tesisin toplam net sermaye yatırım miktarını hesaplayabiliriz. Çizelge 6.22' de hesaplanan değerler verilmiştir.

Amortismanlı yatırım toplamı hesaplandıktan sonra yıllık vergi amortisman miktarı ve yıl sonu vergi karne değeri güncel hızlandırılmış maliyet geri kazanım sistemi (MACRS) ile 15 yıllık vergi ömrü için hesaplanır. Sonuçlar Çizelge 6.23' de verilmiştir.

Çizelge 6.22 Net sermaye yatırım toplamı

Arazi Tutarı	8,000,000
Eskale Edilmiş Tesis İçi Servislerin Maliyeti	124,683,273
Devreye Alma Masrafı	4,117,000
İşletme Sermayesi	17,943,109
Net Harcamalar Toplamı	154,740,383
<u>Ödenekler (AFUDC):</u>	
Ortak Sermaye	8,095,587
İmtiyazlı Senet	2,688,566
Borç	7,631,862
Ödeneklerin Toplamı	18,416,015
Sermaye Yatırımı Toplamı	173,159,397
<u>Amortismanlı ve Amortismansız sermaye yatırımı toplamı;</u>	
Arazi Tutarı	8,000,000
İşletme Sermayesi	17,943,109
Ortak Sermaye Ödeneği	8,095,587
Amortismansız Sermaye Yatırımı Toplamı	34,038,696
Sermaye Yatırımı Toplamı	173,159,397
Amortismansız Sermaye Yatırımı Toplamı	(-)34,038,696
Amortismanlı Sermaye Yatırımı Toplamı	139,120,701
Yatırım vergi indirimi alınmadığından;	
Net Sermaye Yatırımı Toplamı	173,159,397

Yıllık toplam gelir gereksinimi (TRR), toplam sermaye geri kazanımı (TCR), ortak sermaye, imtiyazlı senet ve borçlar için yatırımın minimum getirisi (ROI), gelir vergisi (ITX), diğer vergi ve sigortalar (OTXI), yakıt maliyeti (FC) ve işletme ve bakım maliyeti (OMC) toplamından oluşur:

$$\begin{aligned}
 \text{TRR}(9) = & \text{TCR}(1) + \text{ROI}_{ce}(2) + \text{ROI}_{ps}(3) \\
 & + \text{ROI}_d(4) + \text{ITX}(5) + \text{OTXI}(6) + \text{FC}(7) + \text{OMC}(8) \quad (6.83)
 \end{aligned}$$

Sistemin ekonomik ömrünün her yılı için gelir gereksinimi ve öngörülen maliyeti belirten yıldan yıla analiz, belirli bir değere getirilmiş gelir gereksinimini ve ana ürün maliyetini hesaplamada kullanılır. Sonuçlar Çizelge 6.24' de verilmiştir.

Çizelge 6.23 Yıllık vergi amortisman miktarı ve yıl sonu vergi karne değeri

Ticari işletme Yılı	Takvim Yılı	MACRS Amortisman Faktörü	Yıllık Vergi Amortismanı	Yıl Sonu Vergi Karne Değeri
0	2007	-	-	139,120,701
1	2008	5.00	6,956,035	132,164,666
2	2009	9.50	13,216,467	118,948,199
3	2010	8.55	11,894,820	107,053,379
4	2011	7.70	10,712,294	96,341,085
5	2012	6.93	9,641,065	86,700,021
6	2013	6.23	8,667,220	78,032,801
7	2014	5.90	8,208,121	69,824,680
8	2015	5.90	8,208,121	61,616,558
9	2016	5.91	8,222,033	53,394,525
10	2017	5.90	8,208,121	45,186,404
11	2018	5.91	8,222,033	36,964,370
12	2019	5.90	8,208,121	28,756,249
13	2020	5.91	8,222,033	20,534,215
14	2021	5.90	8,208,121	12,326,094
15	2022	5.91	8,222,033	4,104,061
16	2023	2.95	4,104,061	-
Toplam		100	139,120,701	

Net yatırım sistemin ekonomik ömrü süresince mutlaka geri kazanılmalıdır. Çizelge 6.25 tesisin toplam sermaye geri kazanımının (TCR) yıldan yıla hesaplanmış değerlerini göstermektedir.

D kolonu Çizelge 6.24' deki 1 nolu kolonu karşılamaktadır. A kolonunda gösterilen yıllık karne amortismanı (BD), toplam amortisman yatırımının (TDI) karne ömrüne (BL) bölünmesiyle hesaplanır. B kolonunda gösterilen ertelenmiş gelir vergisi (DITX), vergi ömrü süresinden bir yıl sonrasına kadar olan yıllar için yıllık vergi amortismanı (TXD) ile yıllık karne amortismanı (BD) farkının toplam gelir vergisi oranı (t) ile çarpılarak hesaplanır.

$$DITX = (TXD - BD) * t \quad (6.84)$$

Vergi ömrünün iki sene sonrasından karne ömrünün sonuna kadar olan yıllar için (6.85) eşitliği kullanılarak hesap yapılır.

$$DITX_j = -\frac{\sum_{k=1}^{TL+1} DITX_k}{BL - (TL + 1)}, \quad j = TL+2, \dots, BL \quad (6.85)$$

Çizelge 6.24 Tesisin yıldan yıla gelir gereksinimi analizi (x 10³ Avro)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Takvim	Sermaye	Ortak	İmtiyazlı	Borç	Gelir	Diğer	Yakıt	İşletme ve	Toplam
Yıl	Yılı	Geri	Sermaye	Senet	Faizi	Vergisi	Vergiler	Masrafı	Bakım	Gelir
		Kazanımı	Geri	Temettü			ve		Masrafı	Gereksinimi
			Kazanımı				Sigorta			
1	2008	7,361	9,091	3,039	8,658	7,682	2,494	79,442	2,000	119,767
2	2009	9,740	8,831	2,887	8,225	5,051	2,494	86,353	2,154	125,735
3	2010	9,238	8,446	2,693	7,673	5,199	2,494	93,866	2,320	131,929
4	2011	8,788	8,088	2,508	7,146	5,315	2,494	102,033	2,498	138,870
5	2012	8,381	7,753	2,331	6,642	5,408	2,494	110,909	2,691	146,610
6	2013	8,011	7,439	2,162	6,158	5,482	2,494	120,559	2,898	155,202
7	2014	7,837	7,145	1,998	5,693	5,376	2,494	131,047	3,121	164,711
8	2015	7,837	6,860	1,838	5,236	5,103	2,494	142,448	3,362	175,177
9	2016	7,842	6,575	1,678	4,780	4,825	2,494	154,841	3,620	186,654
10	2017	7,837	6,290	1,517	4,323	4,557	2,494	168,312	3,899	199,229
11	2018	7,842	6,005	1,357	3,866	4,279	2,494	182,956	4,199	212,997
12	2019	7,837	5,720	1,197	3,409	4,011	2,494	198,873	4,523	228,062
13	2020	7,842	5,435	1,036	2,952	3,733	2,494	216,175	4,871	244,537
14	2021	7,837	5,150	876	2,495	3,465	2,494	234,982	5,246	262,544
15	2022	7,842	4,865	716	2,039	3,187	2,494	255,425	5,650	282,217
16	2023	6,277	4,579	55	1,582	4,479	2,494	277,647	6,085	303,698
17	2024	4,718	4,376	422	2,203	5,832	2,494	301,803	6,554	327,401
18	2025	4,718	4,255	317	902	5,693	2,494	328,059	7,058	353,496
19	2026	4,718	4,134	211	601	5,554	2,494	356,601	7,602	381,914
20	2027	4,718	4,013	106	301	5,415	2,494	387,625	8,187	412,857

C kolonunda gösterilen ortak sermaye ödeneğinin geri kazanımı, Çizelge 6.21’de verilen toplam ortak sermaye ödeneğinin karne ömrüne bölünmesiyle hesaplanır.

D kolonundaki toplam sermaye geri kazanımı (TCR), A, B ve C kolonlarının toplanmasıyla elde edilir. Toplam yıllık sermaye geri kazanımlarının toplamı ile işletme sermayesi ve arazi masrafı toplamı tesisin toplam sermaye yatırımına eşittir.

Çizelge 6.26, sermaye geri kazanımının borç, imtiyazlı senet ve ortak sermaye arasında yıldan yıla dağılımını gösterir. Bu çizelge yardımıyla her bir finansman tipi için her yılın bilançosu hesaplanır. Bu bilanço Çizelge 6.24’de 2-4. kolonların temelini oluşturur.

Toplam sermaye yatırım tutarı karne ömrünün ilk yılı için kullanılan finansman oranlarında dağıtılır. Bu şekilde ilk yıl bilançosu hesaplanır. Daha sonra ertelenmiş gelir vergisini de aynı

şekilde imtiyazlı senet ve borçlar için dağıtılır. Ortak sermaye düzeltme kolonu için ertelenmiş gelir vergisi oranına ortak sermaye geri kazanımı ödeneği eklenir. İkinci yılın bilançosu ilk yıldan karne amortismanı ve düzeltme miktarı çıkarılarak bulunur.

Çizelge 6.25 Tesisin yıldan yıla toplam sermaye geri kazanımı analizi

İşletme Yılı	Takvim Yılı	BD	DITX	RCEAF	TCR
		Yıllık Karne Amortismanı	Ertelenmiş Gelir Vergisi	Ortak Sermaye Ödeneği Geri Kazanımı	Toplam Sermaye Geri Kazanımı
1	2008	6,956,035	0	404,779	7,360,814
2	2009	6,956,035	2,378,964	404,779	9,739,778
3	2010	6,956,035	1,876,738	404,779	9,237,553
4	2011	6,956,035	1,427,378	404,779	8,788,193
5	2012	6,956,035	1,020,311	404,779	8,381,126
6	2013	6,956,035	650,250	404,779	8,011,065
7	2014	6,956,035	475,793	404,779	7,836,607
8	2015	6,956,035	475,793	404,779	7,836,607
9	2016	6,956,035	481,079	404,779	7,841,894
10	2017	6,956,035	475,793	404,779	7,836,607
11	2018	6,956,035	481,079	404,779	7,841,894
12	2019	6,956,035	475,793	404,779	7,836,607
13	2020	6,956,035	481,079	404,779	7,841,894
14	2021	6,956,035	475,793	404,779	7,836,607
15	2022	6,956,035	481,079	404,779	7,841,894
16	2023	6,956,035	-1,083,750	404,779	6,277,064
17	2024	6,956,035	-2,643,293	404,779	4,717,521
18	2025	6,956,035	-2,643,293	404,779	4,717,521
19	2026	6,956,035	-2,643,293	404,779	4,717,521
20	2027	6,956,035	-2,643,293	404,779	4,717,521
Toplam		139,120,701	0	8,095,587	147,216,288
Arazi ve İşletme Sermayesi					25,943,109
Toplam Sermaye Yatırımı					173,159,397

Tesis ömrünün bitişindeki yılın bilançosu borç ve imtiyazlı senet için sıfır iken ortak sermaye için arazi ve işletme sermayesi miktarının toplamına eşittir. Toplam karne amortismanı ile toplam düzeltme miktarının toplamı ise toplam sermaye geri kazanımına eşittir. Çizelge 6.25 ve 6.26' nın son kolonlarındaki yıllık sermaye geri kazanımı değerleri Çizelge 6.24'de ilk kolonda tekrar etmektedir.

Bütün yatırım tipleri için yatırımın minimum getirisi (ROI) yıllık bilanço ile yıllık geri dönüşüm oranı ile çarpılarak hesaplanır.

Çizelge 6.26 Yıllan yıla sermaye geri kazanımının dağılımı ($\times 10^3$ €)

Yıl	Takvim Yılı	Borç			İmtiyazlı Senet			Ortak Sermaye			Toplam Sermaye Geri Kazanımı
		Ödenek	Karne Amortismanı	Düzeltilme	Ödenek	Karne Amortismanı	Düzeltilme	Ödenek	Karne Amortismanı	Düzeltilme	
1	2008	86,580	4,329	0	25,974	1,299	0	60,606	1,328	405	7,361
2	2009	82,251	4,329	1,189	24,675	1,299	357	58,873	1,328	1,237	9,740
3	2010	76,732	4,329	938	23,020	1,299	282	56,307	1,328	1,062	9,238
4	2011	71,465	4,329	714	21,439	1,299	214	53,917	1,328	904	8,788
5	2012	66,422	4,329	510	19,927	1,299	153	51,684	1,328	762	8,381
6	2013	61,583	4,329	325	18,475	1,299	98	49,594	1,328	632	8,011
7	2014	56,929	4,329	238	17,079	1,299	71	47,633	1,328	571	7,837
8	2015	52,362	4,329	238	15,709	1,299	71	45,734	1,328	571	7,837
9	2016	47,795	4,329	241	14,339	1,299	72	43,834	1,328	573	7,842
10	2017	43,226	4,329	238	12,968	1,299	71	41,932	1,328	571	7,837
11	2018	38,659	4,329	241	11,598	1,299	72	40,033	1,328	573	7,842
12	2019	34,089	4,329	238	10,227	1,299	71	38,131	1,328	571	7,837
13	2020	29,522	4,329	241	8,857	1,299	72	36,232	1,328	573	7,842
14	2021	24,953	4,329	238	7,486	1,299	71	34,330	1,328	571	7,837
15	2022	20,386	4,329	241	6,116	1,299	72	32,430	1,328	573	7,842
16	2023	15,816	4,329	-542	4,745	1,299	-163	30,529	1,328	25	6,277
17	2024	12,029	4,329	-1,322	3,609	1,299	-396	29,175	1,328	-520	4,718
18	2025	9,022	4,329	-1,322	2,707	1,299	-396	28,367	1,328	-520	4,718
19	2026	6,015	4,329	-1,322	1,804	1,299	-396	27,559	1,328	-520	4,718
20	2027	3,007	4,329	-1,322	902	1,299	-396	26,751	1,328	-520	4,718
21	2028	0	0	0	0	0	0	25,943	0	0	0
Toplam		86,580	0		25,974	0		26,567	8,096	147,216	

Çizelge 6.24'deki 5 ve 6. kolonlar vergi ve sigorta ile ilgilidir. Gelir vergisi (ITX) hesabı eşitlik (6.86) yardımıyla bulunur. Bu eşitlikteki t, toplam gelir vergisi oranıdır.

$$ITX = (t/1-t) \cdot (ROI_{ce} + ROI_{ps} + RCEAF) - DITX \quad (6.86)$$

Diğer vergiler ve sigorta (OTXI) maliyeti, tesis içi servislerin maliyetinin Çizelge 6.20' deki emlak vergisi ve sigorta vergisi oranlarının toplamı ile çarpılarak bulunur.

Yakıt maliyeti ile işletme ve bakım maliyeti çizelgenin 7 ve 8. kolonunda yer almaktadır. Yıllık toplam gelir gereksinimi (TRR), yukarıdaki bileşenlerin toplamı ile bulunur.

Tesis dizaynında düzeltme düşünüldüğünde bütün ekipmanlar bir değere getirilmiş maliyetleri kullanılır. Yıllık toplam gelir gereksinimi maliyetinin belirli bir değere getirmek için Çizelge

6.20' de verilen şimdiki değerlerinin toplamı alınır ve eşitlik (6.87) kullanılarak eşdeğer yıllık ödenek değerine çevirilir. 20 yıl işletme için yıllık toplam gelir gereksinimi maliyetinin belirli bir değere getirilmiş eşdeğer yıllık ödeneği 179,3 milyon €' dur.

$$\frac{P}{A} = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (6.87)$$

Aynı şekilde belirli bir değere getirilmiş yakıt maliyeti ile işletme ve bakım maliyetleri 145,1 milyon € ve 3,4 milyon €' dur.

Belirli bir değere getirilmiş yıllık sermaye ve vergi maliyeti yıllık toplam gelir gereksinimi değerinden yakıt ile işletme ve bakım maliyetlerinin çıkarılması ile bulunur. Çizelge 6.27, 20 yıllık tesis ömrü için belirli bir değere getirilmiş maliyet hesaplamasını özetlemektedir.

Çizelge 6.27 20 yıllık tesis ömrü için belirli bir değere getirilmiş maliyet tablosu

	Mevcut € kuru 20 yıllık Ömür	Katkı oranı (%)
Sermaye ve Vergiler	30,836,752	17.2
Yakıt Masrafı	145,084,857	80.9
Bakım ve İşletme Masrafı	3,380,972	1.9
Toplam Gelir Gereksinimi	179,302,582	100

Tesisde üretilen bölgesel ısıtmada kullanılacak ısıнын birim maliyetini bulabilmek için düşünülen yöntem “Çok amaçlı enerji üretim sistemlerinin termoekonomik optimizasyonu” adlı doktora tezinde anlatılmıştır (Çetin, 2005). Önce tesisin sadece elektrik üreteceği varsayılarak toplam gelir gereksinimi maliyetinin tesiste üretilen toplam elektrik enerjisi miktarına ve yıllık çalışma saatine bölünmesiyle elektrik birim maliyeti bulunur. Toplam elektrik enerjisi miktarı, gaz türbininde üretilen 180,7 MW_{el} ile buhar türbininde üretilen 70,5 MW_{el} elektrik enerjilerinin toplanmasıyla bulunur. Buna göre g_e birim elektrik maliyeti,

$$g_e = 179,302,582 \text{ (€/yıl)} / (251.2 \text{ MW}_{el} * 8300 \text{ h/yıl})$$

$$g_e = 86 \text{ €cent/kWh}$$

olarak bulunur. 160 MW_{th} ısı enerjisi üretmek için buhar türbininde 17.4 MW_{el} kaybı olmaktadır. Isı maliyetinin birim fiyatı bu elektrik kayıp maliyetini karşılamalı düşüncesiyle g_{th} ısı maliyetinin birim fiyatı;

$$g_{th} * 160 MW_{th} = g_e * 17.4 MW_{el}$$

$$g_{th} = 9.4 \text{ ¢cent/kWh}$$

olarak bulunur.

Çizelge 6.28’de, maliyet analizi sonucunda bulunan birim fiyatlar altında tesisin 20 yıllık ömrü boyunca genel gelir gider bilgileri ile sistemin geri ödeme süresi gösterilmiştir. Bulduğumuz birim fiyatlarla sistem kendini 3 yıl sonunda amorti etmektedir.

Çizelge 6.28 20 yıllık tesis ömrü için gelir gider bilgileri ve geri ödeme süresi

Yıllar			Gelir	Gider	Para Akışı	İndirimli Para Akışı	Birikmiş İndirimli Para Akışı
1		2006	0	87	-87	-87	-87
2		2007	0	52	-52	-52	-139
3	1	2008	71	67	4	4	-135
4	2	2009	169	71	98	84	-51
5	3	2010	169	71	98	78	28
6	4	2011	169	71	98	73	100
7	5	2012	169	71	98	67	168
8	6	2013	162	71	91	58	226
9	7	2014	162	71	91	54	280
10	8	2015	162	71	91	50	330
11	9	2016	162	71	91	47	376
12	10	2017	162	71	91	43	420
13	11	2018	162	71	91	40	460
14	12	2019	162	71	91	37	497
15	13	2020	162	71	91	35	532
16	14	2021	162	71	91	32	564
17	15	2022	162	71	91	30	594
18	16	2023	162	71	91	28	621
19	17	2024	162	71	91	26	647
20	18	2025	162	71	91	24	671
21	19	2026	162	71	91	22	693
22	20	2027	162	71	91	21	714

6.5 Tesisin Ekserjoekonomik Analizi

Bir önceki bölümde ekserji analizi yapılan tesisin elemanları için, hesaplanan ekserji değeri ile beraber ekonomik analiz yapıp ürün maliyet denklemleri elde edilecektir. Bunun için ekserji analizi yapılan her bir elemana ekserji maliyet denge denklemi uygulanacaktır.

Bir sistemin ekserjoekonomik analizi yapılırken iş akışkanının sisteme girdiği noktadan hesaplamalara başlanır. Çünkü, bir elemanın çıktısı diğer elemanın girdisidir. Her bir

elemandaki maliyet denge denkleminde, bilinmeyen sayısından bir eksik olacak şekilde gerekli kabuller yapılır. Böylece bir sonraki elemana giriş maliyeti de hesaplanmış olur. Sırayla bütün elemanlara bu hesap tarzı uygulanırsa en son ürüne ait maliyet elde edilir.

Sisteme hava, su ve yakıt girer. Kompresöre giren havanın maliyeti sıfır alınmıştır. Yıllık bakım ve işletme masrafları sistem elemanlarına paylaştırılmıştır. Yatırım maliyeti hesaplarında geri dönüşüm süresi 20 yıl alınarak levelized-cost yöntemiyle yatırım maliyeti hesaplanmıştır. Sürekli akış şartları alınıp, kompresörden başlanarak analiz yapılmıştır.

Bir elemana ait yatırım ve işletme bakım maliyeti Çizelge 6.18 ve 6.26'da ki değerler kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$K = ((\text{Sermaye ve Vergiler} + \text{Bakım ve İşletme maliyeti}) / \text{Yıllık çalışma saati}) * (\text{Eleman maliyeti} / \text{Toplam ekipman maliyeti}) \quad (6.88)$$

Bu hesap tarzıyla elemana o yıl için düşen maliyet payı belirlenir. Bu oran yıl boyunca sabittir. (Sevilgen, 2002)

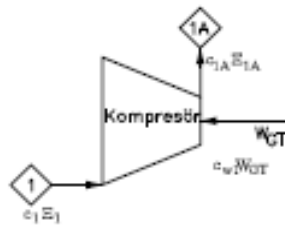
6.5.1 Kompresör Maliyet Analizi

Kompresörün girdisi hava ve iş olup ürün olarak basınçlı hava çıkmaktadır. Hava atmosferden alındığı için maliyeti ihmal edilmiştir (Şekil 6.17).

Kompresör için ekserjoeekonomik maliyet bağıntıları:

$$c_1 \Xi_1 + c_{w1} \Xi_K + K_k = c_{1A} \Xi_{1A} \quad (6.89)$$

Bu bağıntıda c , birim ekserji başına belirli bir değere getirilmiş maliyeti, Ξ , ekserji miktarını ve K , ekipmanın belirli bir değere getirilmiş satınalma maliyetini ifade eder.



Şekil 6.17 Kompresör maliyet akışı

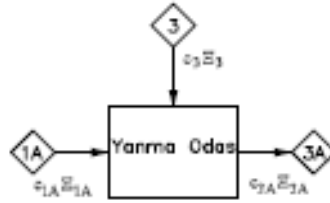
Kompresöre giren iş, kompresörün ekserjisine eşittir ($W_K = \Xi_K$) ve türbinde elde edilen işle aynı türden olduğu için maliyetleri de birbirine eşittir. Kompresörün belirli bir değere getirilmiş satın alma maliyeti eşitlik (6.88) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$K_k = ((29,427,102 + 3,701,726) / 8300) * (15,392,787 / 68,895,942)$$

$$K_k = 921.1 \text{ €/h}$$

6.5.2 Yanma Odası Maliyet Analizi

Yanma odasına basınçlı hava ve yakıt girmekte, egzoz gazları ürün olarak çıkmaktadır (Şekil 6.18). Yakıt sisteme dışardan alındığı için yakıt maliyeti bilinmektedir.



Şekil 6.18 Yanma odası maliyet akışı

Yanma odası için ekserjoekonomik maliyet bağıntıları:

$$c_{1A}\Xi_{1A} + c_3\Xi_3 + K_y = c_{3A}\Xi_{3A} \quad (6.90)$$

$$K_y = 83.4 \text{ €/h}$$

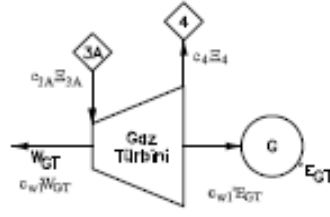
6.5.3 Gaz Türbini Maliyet Analizi

Yanma odasından çıkan egzoz gazları türbinde genişleyerek iş elde edilmektedir (Şekil 6.19). Bunun bir miktarı net iş olup geri kalanı ile kompresör tahrik edilmektedir. Türbinin ekserjisi net işe eşittir.

Türbine giren ve çıkan egzoz gazlarının maliyetleri eşit alınmıştır. Ayrıca kompresörü tahrik eden iş ve net işin maliyeti de eşit alınmıştır.

Gaz türbini için ekserjoekonomik maliyet bağıntıları:

$$c_{3A} = c_4 \quad (6.91)$$



Şekil 6.19 Gaz türbini maliyet akışı

$$c_{3A}\Xi_{3A} + K_T = c_4\Xi_4 + c_{w1}W_{GT} + c_{w1}E_{GT} \quad (6.92)$$

$$K_T = 922.1 \text{ €/h}$$

6.5.4 Isı Geri Kazanımlı Buhar Üretici (HRSG) Maliyet Analizi

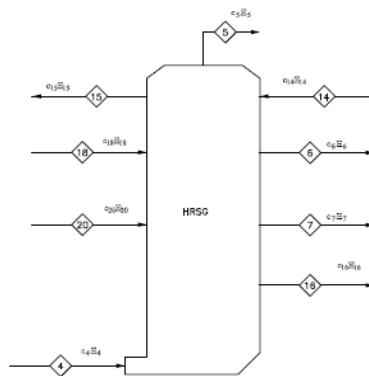
Gaz türbininden çıkan egzost gazı kazan içerisinde yüksek basınçlı ve alçak basınçlı buhar üretiminde kullanılır ve bacadan dışarı atılır (Şekil 6.20). Egzost gazının maliyeti 4 ve 5 noktalarında eşittir. 6, 7 ve 16 noktalarındaki buhar maliyetleri ile 14 noktasından kızdırıcıya giren ve 15 noktasından çıkan kondens suyunun maliyeti de eşit alınmıştır.

Isı geri kazanımlı buhar üreticisi için ekserjoekonomik maliyet bağıntıları:

$$c_4\Xi_4 + c_{14}\Xi_{14} + c_{18}\Xi_{18} + c_{20}\Xi_{20} + K_a = c_5\Xi_5 + c_6\Xi_6 + c_7\Xi_7 + c_{15}\Xi_{15} + c_{16}\Xi_{16} \quad (6.93)$$

$$c_4 = c_5 \quad (6.94)$$

$$c_6 = c_7 = c_{16} \quad (6.95)$$



Şekil 6.20 Isı geri kazanımlı buhar üreticisi maliyet akışı

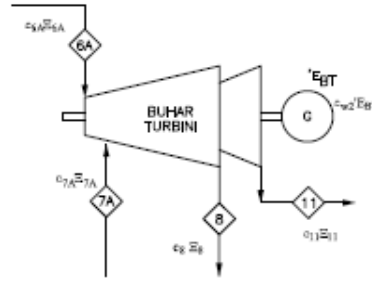
$$c_{14} = c_{15} \quad (6.96)$$

$$c_{14} = (c_{10}m_{10} + c_{13}m_{13}) / m_{14} \quad (6.97)$$

$$K_a = 707 \text{ €/h}$$

6.5.5 Buhar Türbini Maliyet Analizi

Kazanda üretilen buhar 6A ve 7A noktalarından türbine girer (Şekil 6.21). 8 noktasından bölgesel ısıtma için ara buhar çekilir. 11 noktasından türbini terkeden buharın maliyeti sıfır alınmıştır. Buhar maliyetleri eşit alınmıştır.



Şekil 6.21 Buhar türbini maliyet akışı

Buhar türbini için ekserjoeekonomik maliyet bağıntıları:

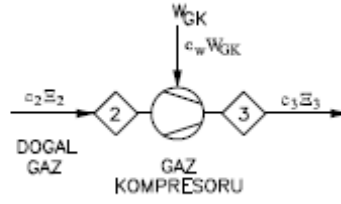
$$c_{6A}\Xi_{6A} + c_{7A}\Xi_{7A} + K_{BT} = c_8\Xi_8 + c_{11}\Xi_{11} + c_{w2}E_{BT} \quad (6.98)$$

$$c_{6A} = c_{7A} = c_8 \quad (6.99)$$

$$K_{BT} = 829.7 \text{ €/h}$$

6.5.6 Gaz Kompresörü Maliyet Analizi

Dışarıdan alınan doğal gaz 2 noktasından kompresöre girer ve sıkıştırılarak 3 noktasından kompresörü terk edip gaz türbini yanma odasına gider (Şekil 6.22). Doğal gazın birim maliyeti bilinmekte olup 4.56 €/GJ'dür.



Şekil 6.22 Gaz kompresörünün maliyet akışı

Gaz kompreösür için ekserjoekonomik maliyet bağıntıları:

$$c_2 E_2 + c_{w3} W_{gk} + K_{gk} = c_3 E_3 \quad (6.100)$$

$$c_{w3} = (c_{w1} E_{GT} + c_{w2} E_{BT}) / (E_{GT} + E_{BT}) \quad (6.101)$$

$$K_{gk} = 129.4 \text{ €/h}$$

6.5.7 Soğutma Kulesi Maliyet Analizi

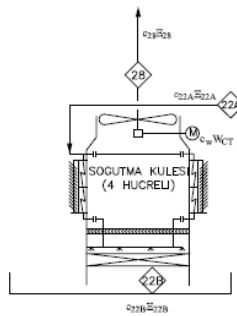
Ana kondenserden 22A noktasından gelen su soğutma kulesinde soğutularak kule havuzunda toplanır (Şekil 6.23). 28 noktasından bir miktar su, su buharı olarak havaya karışmaktadır.

Soğutma kulesi için ekserjoekonomik maliyet bağıntıları:

$$c_{22A} E_{22A} + c_{w3} W_{ct} + K_{ct} = c_{22B} E_{22B} + c_{28} E_{28} \quad (6.102)$$

$$c_{22A} = c_{28} \quad (6.103)$$

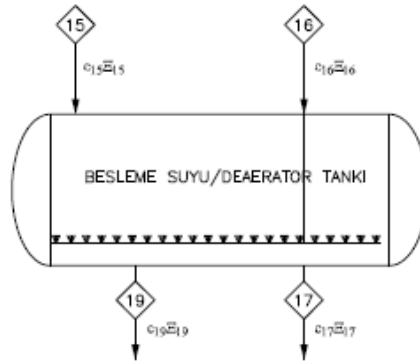
$$K_{ct} = 139.7 \text{ €/h}$$



Şekil 6.23 Soğutma kulesi maliyet akışı

6.5.8 Dearatör Maliyet Analizi

Kazandan gelen kızgın su (15) ile alçak basınçlı buhar (16) dearatörde karışarak kızgın su olarak besleme suyu pompalarından basılarak kazanın ekonomizer bölgesine gönderilir (Şekil 6.24).



Şekil 6.24 Dearatör maliyet akışı

Dearatör için ekserjoeekonomik maliyet bağıntıları:

$$c_{15}E_{15} + c_{16}E_{16} + K_d = c_{17}E_{17} + c_{19}E_{19} \quad (6.104)$$

$$c_{17} = c_{19} \quad (6.105)$$

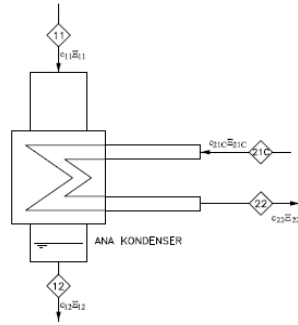
$$K_d = 18.1 \text{ €/h}$$

6.5.9 Ana Kondenser Maliyet Analizi

Buhar türbininde genişleyen buhar 11 noktasından ana kondensere gelir ve ısısını soğutma kulesinden gelen (21C) soğuk suya vererek yoğunlaşır. 12 noktasından ana kondens pompasına girer. Isınan su ise 22 noktasından soğutma kulesine geri döner (Şekil 6.25).

Ana kondenser için ekserjoeekonomik maliyet bağıntıları:

$$c_{11}E_{11} + c_{21C}E_{21C} + K_{mc} = c_{12}E_{12} + c_{22}E_{22} \quad (6.106)$$



Şekil 6.25 Ana kondenser maliyet akışı

$$c_{12} = c_{11} \quad (6.107)$$

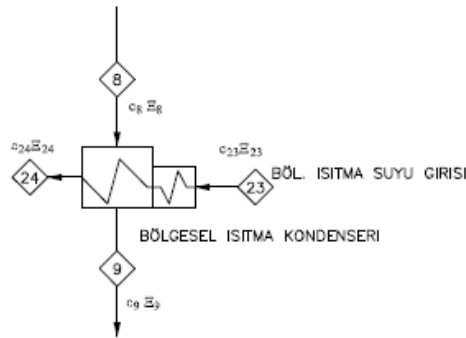
$$K_{mc} = 103 \text{ €/h}$$

6.5.10 Bölgesel Isıtma Kondenseri Maliyet Analizi

Şekil 6.26’da görüldüğü üzere 8 noktasında buhar türbininden çekilen ara buhar bölgesel ısıtma kondenserine gönderilir. 23 noktasında ısıtma tesisinden gelen su, bu buhar yardımıyla ısıtılarak 24 noktasından şehre gönderilir. Kondenserde yoğuşan su 10 noktasından bölgesel ısıtma kondens pompasına girer. Bölgesel ısıtma suyu girişindeki maliyet sıfır alınmıştır ve çıkışındaki maliyet teze konu olan maliyettir.

Bölgesel ısıtma kondenseri için ekserjoeekonomik maliyet bağıntıları:

$$c_8 \Xi_8 + c_{23} \Xi_{23} + K_{dh} = c_9 \Xi_9 + c_{24} \Xi_{24} \quad (6.108)$$



Şekil 6.26 Bölgesel ısıtma kondenseri maliyet akışı

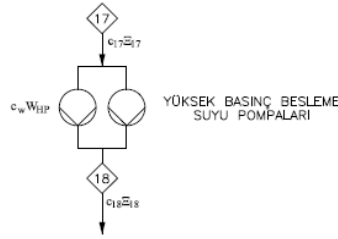
$$c_9 = c_8 \quad (6.109)$$

$$K_{dh} = 39.6 \text{ €/h}$$

6.5.11 Pompaların Maliyet Analizi

6.5.11.1 Yüksek Basınç Besleme Suyu Pompası Maliyet Analizi

Dearatörden gelen su, yüksek basınç pompalarında basınçlandırıldıktan sonra 18 noktasından kazanın yüksek basınç ekonomizerine gelir (Şekil 6.27)



Şekil 6.27 Yüksek basınç besleme suyu pompası maliyet akışı

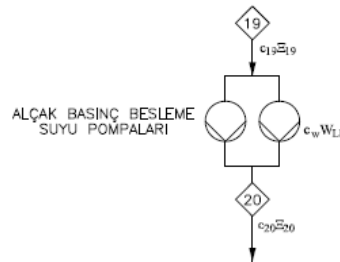
Yüksek basınç besleme suyu pompası için ekserjoekonomik maliyet bağıntıları:

$$c_{17}\Xi_{17} + c_{w3}W_{hp} + K_{hp} = c_{18}\Xi_{18} \quad (6.110)$$

$$K_{hp} = 34.3 \text{ €/h}$$

6.5.11.2 Alçak Basınç Besleme Suyu Pompası Maliyet Analizi

Dearatörden gelen su, alçak basınç pompalarında basınçlandırıldıktan sonra 20 noktasından kazanın alçak basınç ekonomizerine gelir (Şekil 6.28)



Şekil 6.28 Alçak basınç besleme suyu pompası maliyet akışı

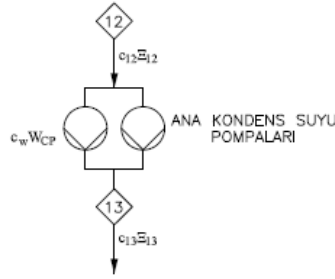
Alçak basınç besleme suyu pompası için ekserjoekonomik maliyet bağıntıları:

$$c_{19}\Xi_{19} + c_{w3}W_{lp} + K_{lp} = c_{20}\Xi_{20} \quad (6.111)$$

$$K_{lp} = 0.7 \text{ €/h}$$

6.5.11.3 Ana Kondens Suyu Pompası Maliyet Analizi

Ana kondenserde yoğuşan su 12 noktasından pompaya girer ve 13 noktasından kazanın ön ısıtıcı bölümüne gönderilir (Şekil 6.29).



Şekil 6.29 Ana kondens suyu pompası maliyet akışı

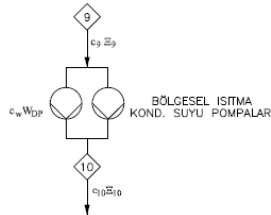
Ana kondens suyu pompası için ekserjoekonomik maliyet bağıntıları:

$$c_{12}\Xi_{12} + c_{w3}W_{cp} + K_{cp} = c_{13}\Xi_{13} \quad (6.112)$$

$$K_{cp} = 7.9 \text{ €/h}$$

6.5.11.4 Bölgesel Isıtma Kondens Suyu Pompası Maliyet Analizi

Bölgesel ısıtma kondenslerinde yoğuşan su 9 noktasından pompaya girer ve 10 noktasından kazanın ön ısıtıcı bölümüne gönderilir (Şekil 6.30).



Şekil 6.30 Bölgesel ısıtma kondens suyu pompası maliyet akışı

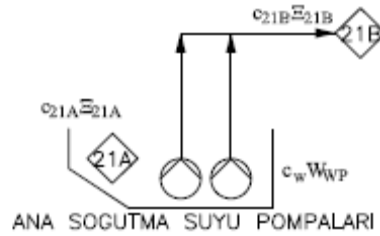
Bölgesel ısıtma kondens suyu pompası için ekserjoekonomik maliyet bağıntıları:

$$c_9 \Xi_9 + c_{w3} W_{dp} + K_{dp} = c_{10} \Xi_{10} \quad (6.113)$$

$$K_{dp} = 7.9 \text{ €/h}$$

6.5.11.5 Ana Soğutma Suyu Pompası Maliyet Analizi

Soğutma kulesi havuzunda toplanan su (21A), 21B noktasından ana soğutma suyu pompaları ile sisteme gönderilir (Şekil 6.31).



Şekil 6.31 Ana soğutma suyu pompası maliyet akışı

Ana soğutma suyu pompası için ekserjoekonomik maliyet bağıntıları:

$$c_{21A} \Xi_{21A} + c_{w3} W_{WP} + K_{WP} = c_{21B} \Xi_{21B} \quad (6.114)$$

$$K_{WP} = 16.2 \text{ €/h}$$

Yukarıdaki bağıntılar EES programında yazılarak çözümlenmiştir. EES programında yazılmış şekli ekte ayrıca verilecektir. Sonuçlar, Çizelge 6.29’da verilmiştir. Isıtma maliyeti ekseji ve ekserjoekonomi analizi yöntemiyle bulunmuştur.

Gaz türbininde üretilen elektriğin birim fiyatı c_{gt} , buhar türbininde üretilen elektriğin birim fiyatı c_{bt} ise üretilen toplam elektriğin birim fiyatı c_{el} , eşitlik (6.106) kullanılarak bulunur.

$$c_{el} = (g_{gt}^* E_{GT} + g_{bt}^* E_{BT}) / (E_{GT} + E_{BT}) \quad (6.115)$$

$$c_{el} = (75.7(\text{€/MWh}) * 180.7(\text{MW}) + 123.5(\text{€/MWh}) * 53.1(\text{MW})) / (180.7(\text{MW}) + 53.1(\text{MW}))$$

$$c_{el} = 86 \text{ €cent / kWh}$$

olarak bulunur. Bölgesel ısıtma için kullanılacak ısıtının maliyeti c_{th} ise, 57 ºcent / kWh olarak bulunmuştur.

Çizelge 6.29 Ekserji değerleri ve birim ekserji başına bir değere getirilmiş maliyet tablosu

Akış	Ekserji (MW)	c (€/GJ)	Ekserji maliyeti (€/h)
1	0.000	0.00	0.000
1A (50)	170.278	23.16	14199.396
2	518.787	10.42	19464.560
3	520.263	10.59	19835.070
3A (51)	551.123	17.20	34124.800
4	130.831	17.20	8099.480
5	10.864	17.20	672.520
6	84.876	23.75	7258.000
6A (52)	84.353	23.75	7212.875
7	14.077	23.75	1204.125
7A (53)	13.911	23.75	1189.875
8	31.284	23.75	2674.250
9	0.876	23.75	76.000
10	0.979	28.10	98.350
11	-0.545	0.00	0.000
12	0.024	0.00	0.000
13	0.036	223.20	22.320
14	0.932	49.20	167.280
15	3.633	49.20	644.520
16	1.425	23.75	121.125
17	3.285	51.23	604.514
18	3.818	54.17	742.129
19	0.964	51.23	179.305
20	0.984	53.49	187.215
21C (56)	7.204	0.00	0.000
22	6.688	4.27	103.003
23	17.790	0.00	0.000
24	46.256	15.85	2639.025

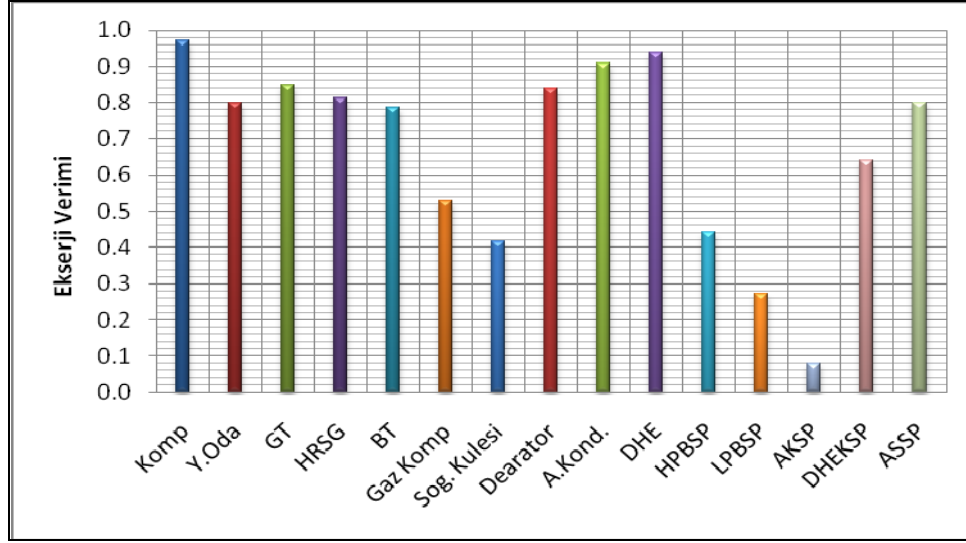
Çizelge 6.30' da, ekserjoekonomik analiz sonucunda bulunan birim fiyatlar altında tesisin 20 yıllık ömrü boyunca genel gelir gider bilgileri ile sistemin geri ödeme süresi gösterilmiştir. Bulduğumuz birim fiyatlarla tesis kendini 2 yıl sonunda amorti etmektedir.

Çizelge 6.30 20 yıllık tesis ömrü için gelir gider bilgileri ve geri ödeme süresi

Yıllar			Gelir	Gider	Para Akışı	İndirimli Para Akışı	Birikmiş İndirimli Para Akışı
1		2006	0	87	-87	-87	-87
2		2007	0	52	-52	-52	-139
3	1	2008	78	67	11	10	-128
4	2	2009	183	71	112	97	-31
5	3	2010	183	71	112	90	58
6	4	2011	183	71	112	83	142
7	5	2012	183	71	112	77	219
8	6	2013	176	71	105	67	286
9	7	2014	176	71	105	63	349
10	8	2015	176	71	105	58	407
11	9	2016	176	71	105	54	461
12	10	2017	176	71	105	50	511
13	11	2018	176	71	105	47	558
14	12	2019	176	71	105	43	601
15	13	2020	176	71	105	40	641
16	14	2021	176	71	105	37	678
17	15	2022	176	71	105	35	713
18	16	2023	176	71	105	32	745
19	17	2024	176	71	105	30	775
20	18	2025	176	71	105	28	802
21	19	2026	176	71	105	26	828
22	20	2027	176	71	105	24	852

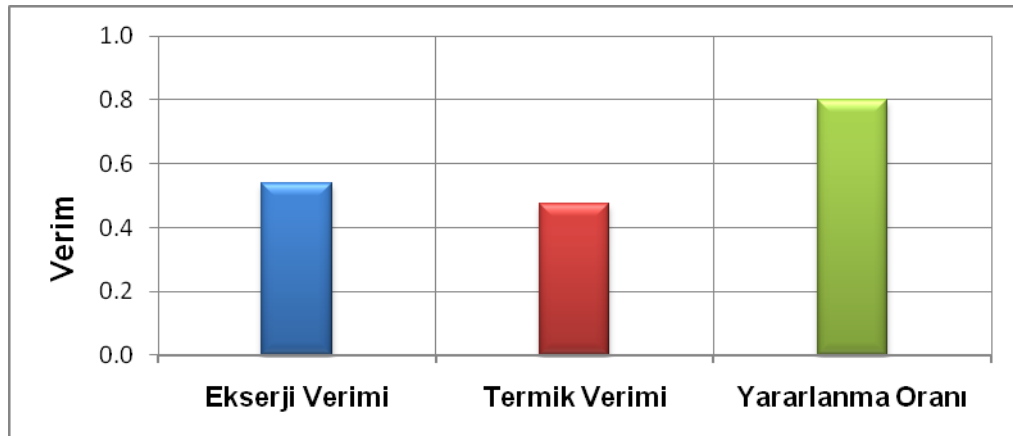
7. SONUÇ

Bu çalışmada yapılmakta olan bir kombine çevrim kojenerasyon tesisinin ekserji, maliyet ve ekserjoeкономи analizleri yapılmıştır. Bölüm 6.3’de yapılan hesaplamalar sonucunda tesisi oluşturan birimlerin ekserji verimleri ve ekserji bozunumu değerleri bulunmuştur. Şekil 7.1, tesisdeki birimlerin ekserji verimlerini göstermektedir.



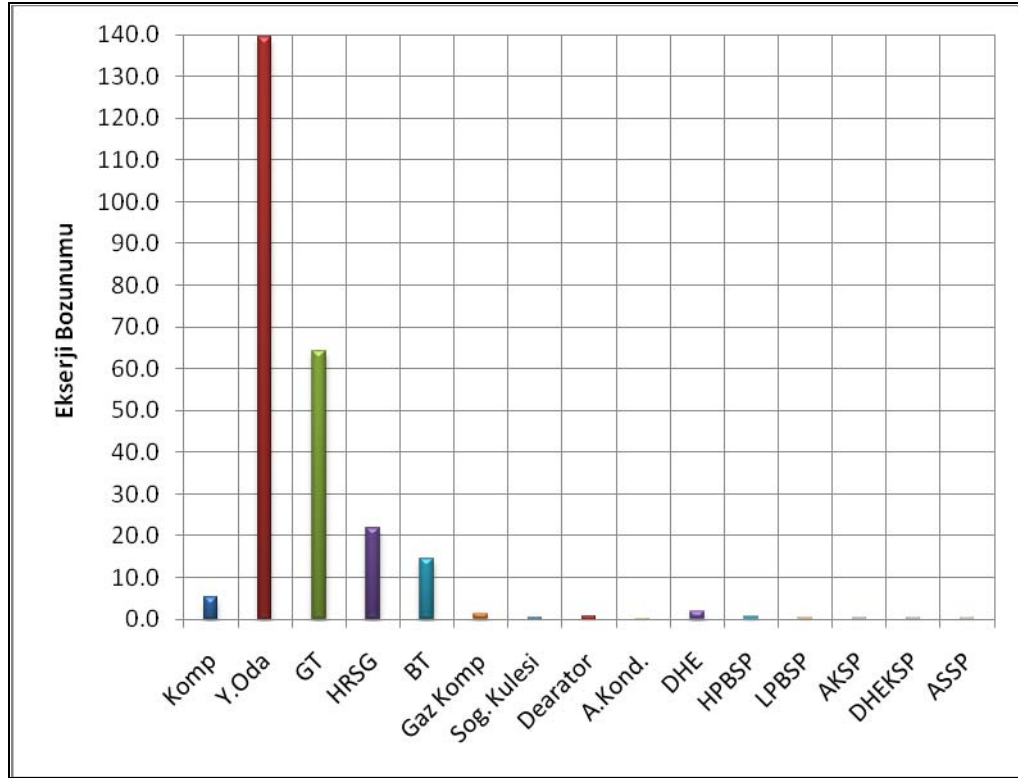
Şekil 7.1 Tesisdeki birimlerin ekserji verimleri

Şekil 7.1’de de görüldüğü gibi en yüksek ekserji verimine ($\epsilon=0.97$) kompresörün sahip olduğu görülmektedir. Tesisin genel ekserji verimi ise %54, termik verimi %47 ve yararlanma oranı %79’ dur. Şekil 7.2, tesisin genel verimlerini göstermektedir.



Şekil 7.2 Tesise ait genel verim ifadeleri

Tesisdeki birimlerin ekserji bozunumlarını gösteren Şekil 7.3'e göre, ekserji bozunumu en fazla olan birim ($\Xi_T=139.42$ MW) yanma odasıdır. Tesisin genel ekserji bozunum miktarı ise 246.17 MW'dır.

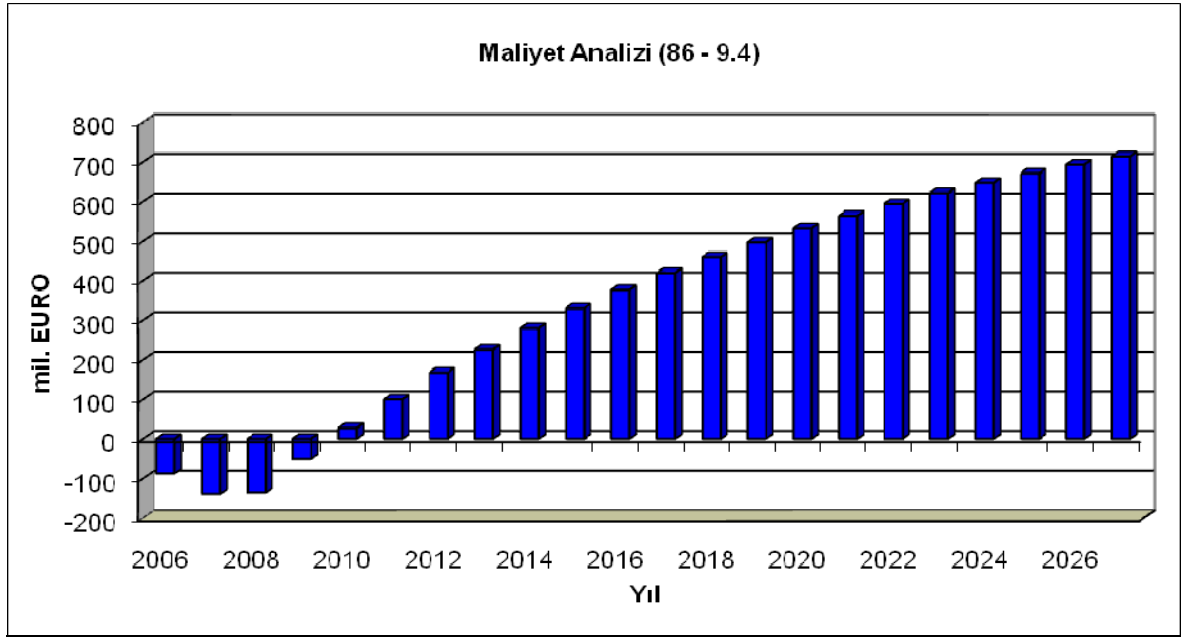


Şekil 7.3 Tesisdeki birimlerin ekserji bozunumları

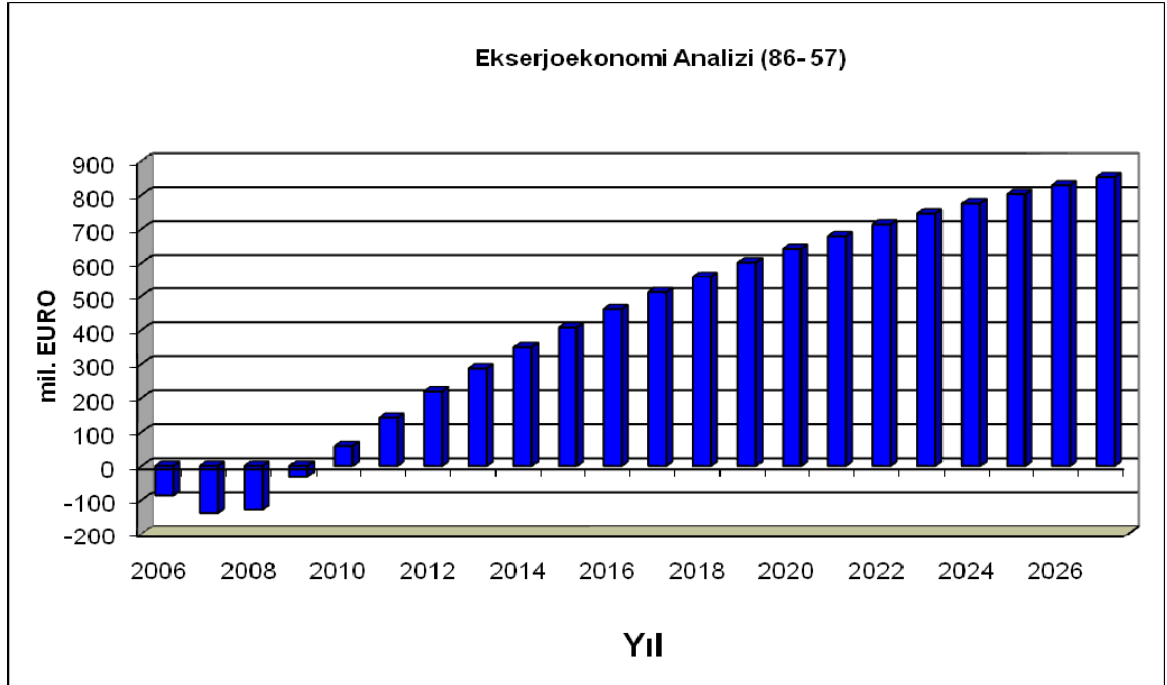
Sisteme yapılan maliyet analizi sonucunda sistemin net yatırım maliyeti 159.6 milyon € bulunurken belirli bir değere getirilmiş yıllık toplam geri kazanım miktarı 179.3 milyon €'dur. Buna göre sistemde üretilen elektrik ve ısının birim maliyetleri hesaplanmıştır. Elektriğin birim kWh başına maliyeti 0.086 €, bölgesel ısıtmada kullanılacak ısının birim kWh başına maliyeti 0.0094 € olarak bulunmuştur. Bulunan bu birim fiyatlar altında tesisin 20 yıllık ömrü boyunca genel gelir gider bilgileri ile sistemin geri ödeme süresi Şekil 7.4'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Sisteme son olarak uygulanan ekserjoekonomi analizi ile birim ekserji başına maliyetler hesaplanmış ve Çizelge 6.29'da verilmiştir. Bu hesaplara göre birim ekserji başına birim elektrik ve birim ısı maliyetleri bulunmuştur. Elektriğin birim kWh başına maliyeti 0.086 €, bölgesel ısıtmada kullanılacak ısının birim kWh başına maliyeti 0.057 € olarak bulunmuştur. Bulunan bu birim fiyatlar altında tesisin 20 yıllık ömrü boyunca genel gelir gider bilgileri ile

sistemin geri ödeme süresi Şekil 7.5’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.4 Maliyet analizi birim fiyatlarına göre tesisin para akışı



Şekil 7.5 Ekserjoekonomi analizi birim fiyatlarına göre tesisin para akışı

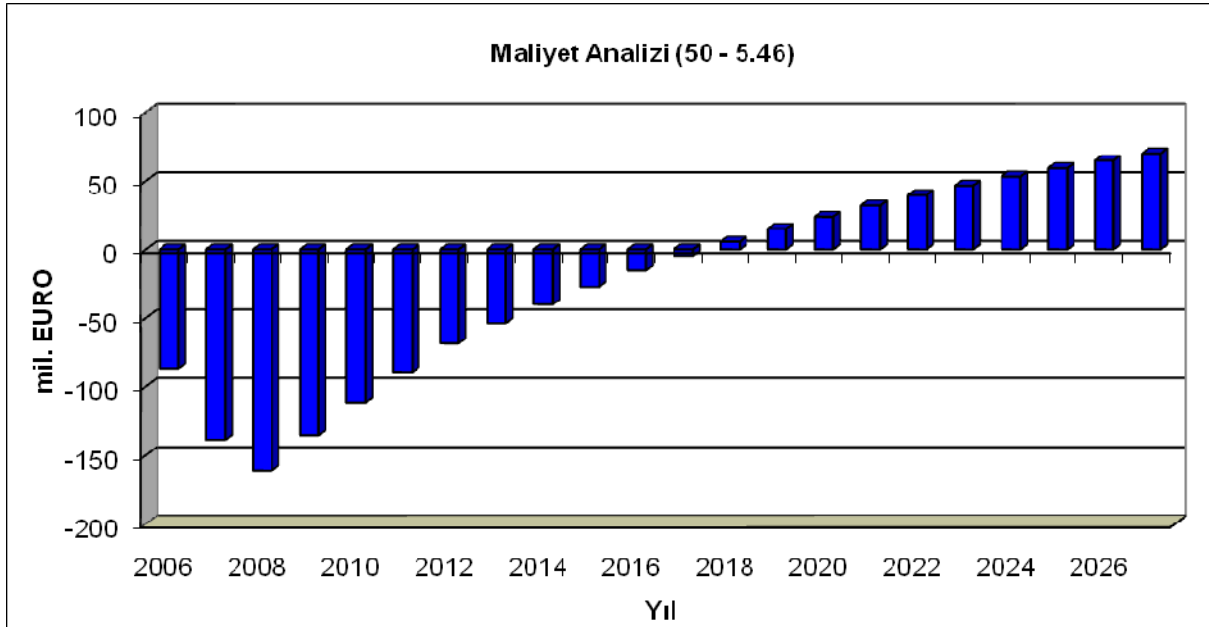
Hesaplanan geri ödeme süreleri ve tesisin yapıldığı yerdeki elektrik (56 ¢cent/kWh) ve ısı (40 ¢cent/kWh) birim fiyatları göz önüne alındığında tesis karlı olacağı fakat bir o kadar da

ürünleri pahalıya satacağı görülmüştür. Bu durumda tesisin geri ödemesi uzun tutularak bulunan birim fiyatlar mevcut yerel fiyatlara göre optimize edilmelidir. Bulunan ve optimize edilen birim fiyatlar Çizelge 7.1’ de gösterilmiştir.

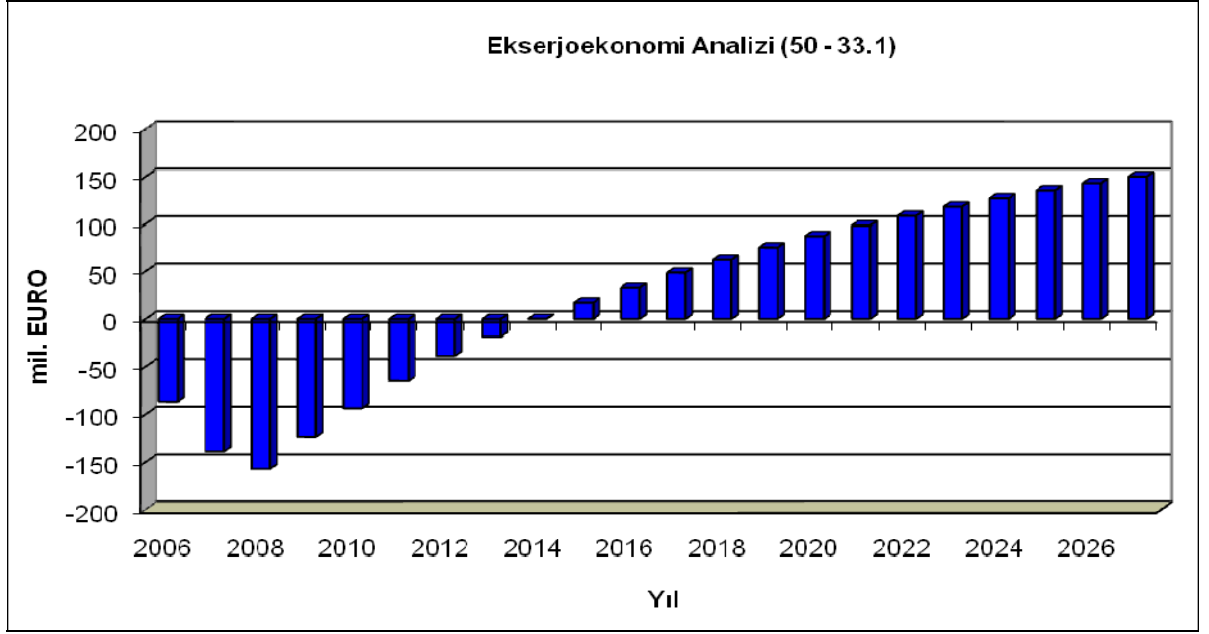
Çizelge 7.1 Maliyet ve ekserjoekonomik analiz sonucunda bulunan birim maliyetler

	Maliyet Analizi g (€cent/kWh)			Ekserjoekonomik Analiz c (€cent/kWh)		
Elektrik Birim Maliyeti	86	50	45	86	50	45
Isı Birim Maliyeti	9.4	5.46	4.92	57	33.1	29.8
Geri Ödeme Süresi	3 Yıl	11 yıl	19 yıl	2 Yıl	8 yıl	12 yıl

Şekil 7.6 ve 7.7, Çizelge 7.1’deki optimize edilen değerlere göre tesisin para akış durumunu göstermektedir.



Şekil 7.6 Optimize edilen maliyet analizi birim fiyatlarına göre tesisin para akışı



Şekil 7.7 Optimize edilen ekserjoekonomi analizi birim fiyatlarına göre tesisin para akışı

KAYNAKLAR

- Ağabay, Ö., (1993a), “Kojenerasypn Teknolojileri”,Doğal Gaz, 25:51-56.
- Ağabay, Ö., (1993b), “Kojenerasypn Teknolojileri”,Doğal Gaz, 28:110-111.
- Arıkol, M., (1985) “Enerji Analizine Giriş”, Mae, Gebze.
- Aybers, N., Şahin, B., (1995), “Enerji Maliyeti”, Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G. Moran, M. (1996), “Thermal Design and Optimization”, John Wiley and Sons, USA.
- Büyüktür, A.R., (1986), “Termodinamik Cilt 1,2”, Uludağ Üniversitesi Basımevi.
- Chambers, A.K., Potter, I., (2002), “Options for Co-Generation”, Alberta Research Council, 42:135-146.
- Cornelissen, R.L., (1997), “Thermodynamics and Sustanable Development (The Use of Exergy Analysis and The Reduction of Irreversibility), Enschede, The Netherlands.
- Çengel, A.Y., Boles, M.A., (1998), “An Engineering Approach Thermodynamic”, Mc. Graw Hill, USA.
- Çengel, A.Y., Boles, M.A., (1994), “Mühendislik Yaklaşımı İle Termodinamik”, Literatür Yayınevi , İstanbul.
- Çetin, B., (2005), “Çok Amaçlı Üretim Sistemlerinin Termoeconomik Optimizasyonu”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Çomaklı, K., Karşlı, S., Yılmaz, M., (2004), “Termal Sistemlerin Ekserjetik Analizi”, Termodinamik Dergisi, 11:94-98.
- Derbentli, T., (1986), “Birleşik Isı Güç Üretiminde Kullanılan İki Buhar Çevriminin Birinci ve ikinci Kanun Çözümlemesi”, Isı Bilimi ve Tekniği 7. Ulusal Kongresi, 34-45.
- Dilip, R., (1992), “Planning Cogeneration Systems”, Fairmont Pres, Atlanta.
- Dinçer, İ., (2000), “Thermodynamics, Exergy and Enviromental Impact”, Energy Conversion and Management, 38:685-696.
- Dinçer, İ., (2002), “The Role of Exergy in Energy Policy Making”, Energy Policy, 30:137-149.
- Emho, L., (2003), “District Energy Efficiency Improvement with Trigeneration”, Energy Engineering ProQuest Science Journals, 100:66-80.
- Gürhan, L.A., (2003), “Kojenerasyon Sistemleri ve Amortisman Süresine Etki Eden Parametrelerin Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Hepbaşlı, A. (2001), “Performance Evaluation Criteria for Cogeneration Systems and Industrial Energy Efficiency Regulation in Turkey”, 141-151, ICCI 2001 Bildiriler Kitabı, İstanbul.
- İleri, A., Gürer, T., (1998), “Energy and Exergy Utilization in Turkey during 1995”, Energy,

Vol 23, 1099-1106.

İnallı, M., Yücel, H.L., Işık, E., (2002), “Kojenerasyon Sistemlerinin Teknik ve Ekonomik Uygulanabilirliği”, Mühendis ve Makine Dergisi, 506:45-48.

Kapudere, İ., (2004), “Bir Kojenerasyon Sisteminde Ekserji Analizi Uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Khan, K.H., Rasul, M.G., Khan, M.M.K., (2004), “Energy Conservation in Buildings: Cogeneration and Cogeneration Coupled with Thermal Energy Storage”, Applied Energy, 77:15-34.

Koçak, T., Gülşen, O. (1998), “Bölgesel Isıtma ve Kojenerasyon”, Bölgesel Isıtma ve Kojenerasyon Konferansı, 28-29 Nisan 1998, İstanbul.

Kotas, T.J., (1995), “The Exergy Method of Thermal Plant Analysis”, Kriger Publishing Comp, USA.

Külçe, N., Topuz, G., (1996), “Kojenerasyon Sistemi Seçimi ve Türkiye Örneği”, Doğal Gaz, 45:205-208.

Lucas, K., (2000), “On The Thermodynamics of Cogeneration”, Int. J. Therm. Sci., 39:1039-1046.

Mohanty, B., (2001), “Energy Efficiency”, United Nation, USA.

Özgürel, B., Egeli, S., (1994a), “Kombine Çevrim, Yüksek Verim, Türkiye 6. Enerji Kongresi Teknik Oturum Tebliği.

Riviero, R., Anaya, A., (1997), “Exergy Analysis of Industrial Processes: Energy-Economy-Ecology”, Latin American Applied Research, 27:191-205.

Sevilgen, S.H., (2002), “Enerji Üretim Sistemlerinin Ekserjoekonomik Analizi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Sucuoğlu, S., (1999), “Kojenerasyonun İklim Bölgelerine Göre Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Sürer, F., (2003), “Kombine Gaz/Buhar Türbinli kojenerasyon Sistemlerinin Termodinamik ve Ekonomik Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Sycom, O., (1999), “Review of Combined Heat and Power Technologies”, The California Energy Commission, No:98R020974, USA.

Szargut, J., Morris, R.D., Steward, R.F., (1998), “Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes”, Hemisphere, New York.

Tsatsaronis, G. Moran, J., (1997), “Exergy-Aided Cost Minimization”, Energy Conversion and Management, 38:15-17.

Tsatsaronis. G., Park, M., (2002), “On Avoidable and Unavoidable Exergy Destruction and Investment Costs in Thermal System Desing”, Energy Conversion and Management, 43:1259-1270.

Tsatsaronis. G., Pisa, J., (1994), “Exergoeconomic Evaluation and optimization of Energy

Systems Application to the CGAM problem” Energy, 19:287-321.

Valero, A., Lozano, M., Serra, L., Torres, C., (1994), “Application of the Exergetic Cost Theory to the CGAM Problem”, Energy, 19:365-372.

Valero, A., Lozano, M., Serra, L., Tsatsaronis, G., Pisa, J., Frangopoulos, C., Spakovsky, M., (1994), “CGAM Problem Definition and Conventional Solution”, Energy, 19:279-288.

Valero, A., Lozano, A., Munoz, M., (1986), “A General Theory of Exergy Saving Part 1 on the Exergetic Cost”, Computer Aided Engineering and energy Systems, Vol 3.

Valero, A., Lozano, A., Munoz, M., (1986), “A General Theory of Exergy Saving Part 2 on the Exergetic Cost”, Computer Aided Engineering and energy Systems, Vol 3.

Valero, A., Lozano, A., Munoz, M., (1986), “A General Theory of Exergy Saving Part 3 on the Exergetic Cost”, Computer Aided Engineering and energy Systems, Vol 3.

Wall, G., (1998), “Exergetics, Exergy Ecology Democracy”, Sweden.

Yang, D., Wang, J., (1995), “Methodology for Exergy Energy Costing”, ECOS 95,167-172.

EKLER

EK1 Kombine Çevrim Kojenerasyon Tesisinin Plan Çizimi

EK2 Ekserjoekonomik Analiz Bağlılıklarının EES Programında Yazılımı

"KOMPRESOR"

$c[1] * E[1] + cw[1] * Wgt + Kk = c[50] * E[50]$
 $Wgt = 631.8$
 $Kk = 891.8$
 $E[50] = 613.1$
 $c[1] = 0$
 $E[1] = 0$

"YANMA ODASI"

$c[50] * E[50] + c[3] * E[3] + Ky = c[51] * E[51]$
 $E[3] = 1873.1$
 $Ky = 80.7$
 $E[51] = 1984$

"GAZ TURBİNİ"

$c[51] * E[51] + Kt = c[4] * E[4] + cw[1] * Wgt + cw[1] * Egt$
 $c[51] = c[4]$
 $E[4] = 470.9$
 $Egt = 650.5$
 $Kt = 892.7$

"HRSG"

$c[4] * E[4] + c[14] * E[14] + c[18] * E[18] + c[20] * E[20] + Ka = c[5] * E[5] + c[6] * E[6] + c[7] * E[7] + c[15] * E[15] + c[16] * E[16]$
 $Ka = 684.5$
 $E[14] = 3.4$
 $E[18] = 13.7$
 $E[20] = 3.5$
 $E[5] = 39.1$
 $E[6] = 305.6$
 $E[7] = 50.7$
 $E[15] = 13.1$
 $E[16] = 5.1$
 $c[5] = c[4]$
 $c[6] = c[7]$
 $c[16] = c[6]$
 $c[14] = c[15]$
 $c[14] = (c[10] * m[10] + c[13] * m[13]) / m[14]$

$m[10]=69.1$
 $m[13]=8.38$
 $m[14]=77.48$

"BUHAR TURBINI"

$c[52]*E[52]+c[53]*E[53]+Kbt=c[8]*E[8]+c[11]*E[11]+cw[2]*Ebt$
 $Kbt=803.3$
 $E[52]=303.7$
 $E[53]=50.1$
 $E[8]=112.6$
 $E[11]=-2$
 $Ebt=191.2$
 $c[8]=c[6]$
 $c[11]=0$
 $c[52]=E[6]$
 $c[53]=E[6]$

"GAZ KOMPRESORU"

$c[2]*E[2]+cw[3]*Wgk+Kgk=c[3]*E[3]$
 $Kgk=125.3$
 $Wgk=10.1$
 $E[2]=1867.7$
 $c[2]=10.42$
 $cw[3]=(cw[1]*EGT+cw[2]*EBT)/(EGT+EBT)$

"SOGUTMA KULESI"

$c[54]*E[54]+cw[3]*Wct+Kct=c[55]*E[55]+c[28]*E[28]$
 $Kct=135.2$
 $Wct=2.3$
 $E[54]=25.8$
 $E[55]=25.6$
 $E[28]=0.2$
 $c[54]=c[22]$
 $c[28]=c[22]$

"DEARATOR"

$c[15]*E[15]+c[16]*E[16]+Kd=c[17]*E[17]+c[19]*E[19]$
 $Kd=17.5$
 $E[17]=11.8$
 $E[19]=3.5$
 $c[17]=c[19]$

"MAIN CONDENSER"

$$c[11]*E[11]+c[56]*E[56]+K_{mc}=c[12]*E[12]+c[22]*E[22]$$

$$K_{mc}=99.7$$

$$E[56]=25.9$$

$$E[12]=0.1$$

$$E[22]=24.1$$

$$c[12]=c[11]$$

$$c[56]=0$$

"DHE"

$$c[8]*E[8]+c[23]*E[23]+K_{dh}=c[9]*E[9]+c[24]*E[24]$$

$$K_{dh}=38.4$$

$$E[9]=3.2$$

$$E[23]=64$$

$$E[24]=166.5$$

$$c[23]=0$$

$$c[9]=c[8]$$

"HP PUMP"

$$c[17]*E[17]+c_w[3]*W_{hp}+K_{hp}=c[18]*E[18]$$

$$K_{hp}=33.2$$

$$W_{hp}=4.3$$

"LP PUMP"

$$c[19]*E[19]+c_w[3]*W_{lp}+K_{lp}=c[20]*E[20]$$

$$K_{lp}=0.7$$

$$W_{lp}=0.3$$

"MAIN CONDENSER PUMP"

$$c[12]*E[12]+c_w[3]*W_{cp}+K_{cp}=c[13]*E[13]$$

$$K_{cp}=7.7$$

$$W_{cp}=0.6$$

$$E[13]=0.1$$

"DHE PUMP"

$$c[9]*E[9]+c_w[3]*W_{dp}+K_{dp}=c[10]*E[10]$$

$$K_{dp}=7.7$$

$$W_{dp}=0.6$$

$$E[10]=3.5$$

"MAIN COOLING PUMP"

$$c[57]*E[57]+cw[3]*Wmcp+Kmcp=c[58]*E[58]$$

$$Kmcp=15.7$$

$$Wmcp=1.4$$

$$E[58]=28.6$$

$$E[57]=27.5$$

$$c[58]=c[56]$$

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	03.02.1983	
Doğum yeri	Gerede	
Lise	1998-2002	Pertevniyal Anadolu Lisesi
Lisans	2002-2007	Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak. Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2007-2010	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Enerji Programı

Çalıştığı kurum(lar)

2007-2008	Ekare Mühendislik Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.
2008-2010	Gama Güç Sistemleri Mühendislik ve Taahhüt A.Ş. 220MW _e ve 160 MW _t Üsküp Kombine Çevrim Kojenerasyon Enerji Santrali Projesi