

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKSERJİ ANALİZİ YÖNTEMİ KULLANARAK
DOĞAL GAZLI BİR KOJENERASYON TESİSİNİN
PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Ömer Faruk CAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2005

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKSERJİ ANALİZİ YÖNTEMİ KULLANARAK
DOĞAL GAZLI BİR KOJENERASYON TESİSİNİN
PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

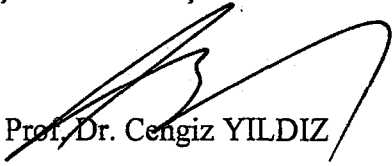
Ömer Faruk CAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez, 15.06.2005 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı /başarısız olarak değerlendirilmiştir.



Danışman: Yrd. Doç. Dr. İhsan DAĞTEKİN



Üye: Prof. Dr. Cengiz YILDIZ



Üye: Yrd. Doç. Dr. Mehmet ESEN

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu' nun 26.06.05 tarih ve 2005/19-2 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanmasında maddi ve manevi hiçbir desteğini eksik etmeyen aileme, çalışmamın her aşamasında beni destekleyen danışman hocam Yrd.Doç.Dr.İhsan DAĞTEKİN' e, bölüm başkanımız Prof. Dr. Cengiz YILDIZ' a, Doç.Dr.Mustafa İNALLI' ya, Prof.Dr.Kâzım PIHTILI' ya, Yüksek Makine Mühendisi Erdem IŞIK' a, İstanbul' daki Esenyurt Termik Santrali İşletme Müdürü Barış BAŞER' e, Operatör 1 Vardiya Amiri Mehmet KARTAL' a, Çorlu' daki Modern Enerji Otoprodüktör Grubu Arıza ve Bakım Mühendisi Levent DURAN' a ve Beşiktaş Kojenerasyon Derneği çalışanlarına teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	I
ŞEKİLLER LİSTESİ	III
TABLolar LİSTESİ	IV
SİMGELER VE KISALTMALAR	V
ÖZET	VIII
ABSTRACT	IX
1. GİRİŞ	1
2. KOJENERASYON SİSTEMLERİ	4
2.1. Kojenerasyon Sistemlerinin Tarihsel Gelişimi	7
2.2. Kojenerasyon Sistemleri Uygulamalarının Ülkemiz ve Dünya İçin Sağladığı Yararlar	8
2.3. Kojenerasyon Sistemlerinin Kazançları, Yakıt Çeşitleri ve Uygulama Alanları	9
2.3.1. Uygulama Alanları	10
2.3.2. Kojenerasyon Sistemlerinde Kullanılan Yakıtlar	10
2.3.2.1. Ticari Olarak Bulunabilen Yakıt Seçeneklerinin Özellikleri	
ve Bugünkü Fiyat Seviyeleri	11
2.3.2.1.1. Kojenerasyon Sistemlerinde Kullanılan Bazı Yakıtların Özellikleri	12
2.4. Türkiye’deki Kojenerasyon Tesisleri	13
3. AÇIK SİSTEMLER İÇİN KÜTLE-ENERJİ-EKSERJİ BALANS EŞİTLİKLERİ	24
3.1. Açık Sistemler İçin Tersinir Faydalı İş	26
3.2. Açık Sistemler İçin Ekserji İfadeleri	28
3.3. Termodinamik Sistemler İçin Birinci ve İkinci Kanun Verimi	30
3.3.1. Gaz Türbinlerinin Birinci Kanun Verimi	31
4. ESENYURT TERMİK SANTRALİ (KOJENERASYON TESİSİ)’NİN PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ	35
4.1. Santralin Genel Çalışma Prensipleri	35
4.2. Performans Hesaplamaları	41
4.2.1. Birinci Kanun Verimi	43
4.2.2. İkinci Kanun Verimi	45

4.2.3. Güç- Isı Oranı	50
4.2.4. Proses Isı Oranı	50
4.2.5. Faydalı Yakıt Verimi	50
4.3. Ekonomik Analiz	52
4.3.1. Ekonomik Verim	54
5. SONUÇLAR	57
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	62
EKLER	
EK-1: Esenyurt Termik Santrali (Kojenerasyon Tesisi)' nin Çalışma Şeması	



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Basit Bir Proses Isı Santrali	4
Şekil 2.2. İdeal Birleşik Güç Santrali	5
Şekil 2.3. Birleşik Isı ve Güç Sistemlerinde %100 Enerji Girdisi İçin Elektrik Üretim Yüzdesi	6
Şekil 2.4. Türkiye’de 1995 Yılı Doğalgaz Kullanımı	20
Şekil 2.5. Türkiye’de 1996 Yılı Doğalgaz Kullanımı	21
Şekil 2.6. Türkiye’de 1997 Yılı Doğalgaz Kullanımı	21
Şekil 2.7. Türkiye’de 2000 Yılı Doğalgaz Kullanımı	22
Şekil 2.8. Türkiye’de 2004 Yılı Doğalgaz Kullanımı	22
Şekil 2.9. Türkiye’nin 2010 Yılı Tahmini Doğalgaz Kullanımı Talebi	23
Şekil 3.1. Enerji Dağılımı	24
Şekil 3.2. SASA Sistem İçin Tersinir ve Tersinmez İşlemler	25
Şekil 3.3. Açık Sistemlerde Kontrol Hacim Bölgesi İçin Enerji Denkliği	26
Şekil 3.4. Gaz Türbini Çevriminin Çalışma Şeması	31
Şekil 3.5. Gaz Türbini Çevriminin P-V Diyagramı	32
Şekil 3.6. Gaz Türbini Çevriminin T-S Diyagramı	32
Şekil 4.1. Esenyurt Termik Santrali (Kojenerasyon Tesisi)’ nin Çalışma Şeması	37
Şekil 4.2. Esenyurt Termik Santrali (Kojenerasyon Tesisi)’ nin Genel Çalışma Şeması	38
Şekil 4.3. Kojenerasyon Sistemlerinin Genel Enerji Akış Şeması	43
Şekil 4.4. Sistem Verimlerinin Karşılaştırılması	51
Şekil 4.5. Üretilen Elektrığe Karşı Proses Isı Üretim Miktarı	51
Şekil 4.6. Proses Isısı Ekserjisi ile Proses Isı Üretimi	52
Şekil 4.7. Bilgisayar Programı İçin Akış Şeması	55

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Kojenerasyon Sistemlerinde Kullanılan Bazı Yakıtların Kimyasal Özellikleri	11
Tablo 2.2. Kojenerasyon Sistemlerinde Kullanılan Bazı Yakıtların Fiyatları	11
Tablo 2.3. Türkiye’deki Kojenerasyon Tesisleri	13
Tablo 2.3.a. Türkiye’deki Kojenerasyon Tesisleri	14
Tablo 2.3.b. Türkiye’deki Kojenerasyon Tesisleri	15
Tablo 2.3.c. Türkiye’deki Kojenerasyon Tesisleri	16
Tablo 2.3.d. Türkiye’deki Kojenerasyon Tesisleri	17
Tablo 2.3.e. Türkiye’deki Kojenerasyon Tesisleri	18
Tablo 2.3.f. Türkiye’deki Kojenerasyon Tesisleri	19
Tablo 2.3.g. Türkiye’deki Kojenerasyon Tesisleri	20
Tablo 4.1.a. Sistemdeki Elemanların Özellikleri	39
Tablo 4.1.b. Sistemdeki Elemanların Özellikleri	40
Tablo 4.2.a. Sistem İşletmede Değilken Ünitelerin Bazı Termodinamik Özellikleri	41
Tablo 4.2.b. Sistem İşletmedeyken Ünitelerin Bazı Termodinamik Özellikleri	42

SİMGELER VE KISALTMALAR

Q_C	: Çıkan güç (kW)
Q_G	: Giren güç (kW)
Q_P	: Proses güç (kW)
P	: Basınç (bar)
T	: Sıcaklık (K)
V	: Hız (m/s)
h	: Özgül entalpi (kJ/kg)
s	: Özgül entropi (kJ/kgK)
s_g	: Oluşan buharın özgül entropisi (kJ/kgK)
W_{terfay}	: Tersinir faydalı iş (kW)
W_{fay}	: Faydalı iş (kW)
dE	: Enerji değişimleri
t	: Zaman (s)
dQ	: Isı değişimleri
dW	: İş değişimleri
dS	: Entropi değişimleri
dm	: Kütle değişimleri
ek	: Kinetik enerji
ep	: Potansiyel enerji
g	: Girenler
ϕ	: Çıkanlar
$Q_{\text{ÇEVRE}}$	: Birim zamanda çevreye verilen ısı (W)
$T_{\text{ÇEVRE}}$	: Çevre sıcaklığı (K)
T_0	: Ortam sıcaklığı (K)
I	: Tersinmezlik miktarı (kJ/s,kW)
X_{SASA}	: Açık sistemin ekserjisi (kJ/s,kW)
X_{PE}	: Potansiyel enerjinin ekserjisi (m^2)
X_{KE}	: Kinetik enerjinin ekserjisi (m^2/s^2)
$X_{\text{KÜTLE}}$	: Kütlenin ekserjisi (kJ)
X_{QNET}	: Net ısıнын ekserjisi (kW)
X_w	: İşin ekserjisi (kW)
X_Q	: Isının ekserjisi (kW)

T_k	: Kaynak sıcaklığı (K)
$X_{kayıp}$	: Ekserji kayıpları (kJ/s)
ΣQ_g	: Sisteme verilen ısı (kJ/s)
W_{net}	: Elde edilen net iş (kW)
W_T	: Türbin işi (kW)
W_k	: Kompresör işi (kW)
r	: Basınç oranı
r_w	: İş oranı
m_s	: Buharın debisi (kg/s)
0	: Başlangıç değerleri
W_{GT}	: Gaz türbini jeneratörünün gücü (MW)
W_{BT}	: Buhar türbini jeneratörünün gücü (MW)
X_Y	: Giren yakıtın ekserjisi (MW)
c	: Yoğuşmuş buhar geri kazanımı (-)
Q_P	: Proses ısı üretim miktarı (MW)
X_{QP}	: Proses ısının ekserjisi (MW)
$Q_{P, TOP}$	: Toplam proses ısı üretim miktarı (MW)
$X_{QP, TOP}$	: Proses ısının toplam ekserjisi (MW)
η_{th}	: Termik makina verimi
η_I	: Birinci kanun verimi
η_{II}	: İkinci kanun verimi
η_{EKS}	: Ekserji verimi
η_{SIST}	: Sistem verimi
η_{GT}	: Gaz türbini verimi
$\eta_{I, KOJ}$	: Kojenerasyon sisteminin birinci kanun verimi
$\eta_{II, KOJ}$	: Kojenerasyon sisteminin ikinci kanun verimi
η_Y	: Yakıtın faydalı verimi
s	: Buhar
Y	: Yakıt
GT	: Gaz türbini
BT	: Buhar türbini
$B.T.Ç.B.$	: Buhar türbininden çıkan buhar
LP	: Düşük basınç (low pressure)
HP	: Yüksek basınç (high pressure)
TE	: Ton eşdeğeri

GÖS : Geri ödeme süresi
EYO : Enerjiden yararlanma oranı
GIO : Güç-Isı oranı
PIO : Proses ısısı oranı
SASA : Sabit akışlı sürekli açık sistem
HRSG : Buhar jeneratörü ısı geri kazanımı (heat recovery of steam generator)
TEDAŞ : Türkiye elektrik dağıtım anonim şirketi
İGDAŞ : İstanbul gaz dağıtım anonim şirketi



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKSERJİ ANALİZİ YÖNTEMİ KULLANARAK DOĞAL GAZLI BİR KOJENERASYON TESİSİNİN PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Ömer Faruk CAN

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2005, Sayfa: 62

Bu çalışmada İstanbul ili sınırları içerisindeki Esenyurt Termik Santralinin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Çalışmada literatür araştırmasından sonra, kojenerasyon tesislerinin genel özellikleri, yararları, bu tesislerde kullanılan yakıt çeşitleri ve bu tip tesislerin ülkemize kazandırdıkları ele alınmıştır. Ülkemizde şu anda işletmede olan kojenerasyon tesislerinin özellikleri tablolar halinde verilerek bu tesislerin bulunduğu bölge, tahrik ünitesi, makine tipi, kullanılan yakıt ve atık ısı sistemleri anlatılmıştır. Açık sistemler için kütle-enerji ve ekserji eşitlikleri verilmiş ve ekserji analizi bu veriler ışığında yapılmıştır.

İncelenen santralin ısı ve ekserji analizi sonucunda; birinci kanun verimi, ikinci kanun verimi, yakıt verimi, güç-ısı oranı ve proses ısı oranı tespit edilmiştir. İkinci kanun verimi %89.5 hesaplanmış olup, bu değerin kojenerasyon tesislerinin değerleri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Elde edilen değerlerin hesaplanabilmesinde bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Santralin ekonomik analizi sonucu ekonomik verim, geri ödeme süresi tespit edilmiş, 4 yıl gibi bir sürede santralin kendini amorti edebildiği görülmüştür. Santralin toplam yatırım maliyetinin 173 milyon dolar olduğu göz önüne alınırsa bu fiyatın 4 yılda geri ödenebilmesi bu tip tesislerin ülkemizde daha fazla yaygınlaştırılması gerektiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kojenerasyon, Ekserji Analizi, Ekonomik Analiz, Termik Santral

ABSTRACT

Master Thesis

EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF A COGENERATION FOUNDATION WORKING WITH NATURAL GAS USING THE METHOD OF EXERGY ANALYSIS

Ömer Faruk CAN

Firat University

Graduate School of Science and Technology

Mechanical Engineering Department

2005, Page 62

In this study, an exergy and economic analysis of Esenyurt Thermic Plant in İstanbul province has been performed. First, a detailed literature research has been made, then general properties of the cogeneration foundations, benefits, kinds of fuels used in these foundations and profits of these foundations for our country have been dealt with. Cogeneration foundations in our country are given in tables which are active now. In the tables, location area of these foundations, actuation units, type of machine, type of fuel and avacuation heat systems have been shown. Exergy analysis has been made under the light of these data by giving mass-energy and exergy equations for open systems.

In the result of exergy analysis of the plant, the first law efficient, the second law efficient, fuel efficient, rate of power-heat and rate of process heat have been determined. That the second law efficient was %89.5 has showed that efficient of the plant has been quite high. Because, this rate is usually between %80-90 in a cogeneration foundation.

A computer programme has been developed in order to evaluate given data more quickly. In the result of economy analysis of the plant, economy efficient was noted for the plant to redeem itself in 4 years which has been determined and considered extremely short. If considered that the total investment cost is 173 million dollars, as it can be repaid in 4 years, it has showed that these kinds of foundations should be much more common.

Keywords: Cogeneration, Exergy Analysis, Economic Analysis, Thermic Plant

1. GİRİŞ

İnsanlar daima ısı enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren aygıtların verimliliğini arttırma çabası içinde olmuşlardır. Bunun temel nedenlerinden biri de fosil yakıtların sınırlı olması ve pahalı olmasıdır. Dünyadaki enerji tüketimi de artan nüfus ile artış göstermektedir. Yenilenemez enerji kaynakları ile tüketim arasındaki açığın gittikçe arttığı görülmektedir. Bu enerji açığını gidermek için, atmosferin kirlenmesi problemini göz önüne alarak, bazı politikalar geliştirilmek zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Bunların arasından biri de kojenerasyon sistemidir. Kojenerasyon kısaca, enerjinin hem elektrik hem de ısı formlarında aynı sistemden beraberce üretilmesidir. Bu birliktelik, iki enerji formunun da tek tek kendi başlarına ayrı yerlerde üretilmesinden daha ekonomik neticeler oluşturmaktadır. Basit çevrimde çalışan, yani sadece elektrik üreten bir gaz türbini ya da motoru kullandığı enerjinin %30-40 kadarını elektrige çevirebilir. Bu sistemin kojenerasyon şeklinde kullanılması halinde sistemden dışarıya atılacak olan ısı enerjisinin büyük bir bölümü de kullanılabilir enerjiye dönüştürülerek toplam enerji girişinin %70-90 arasında değerlendirilmesi sağlanabilir [1]. Bu tekniğe "birleşik ısı-güç sistemleri" ya da kısaca "kojenerasyon" denir. Diğer bir deyişle, kojenerasyon sistemlerin küresel enerji ve çevresel problemlerin çözümünde önemli bir rol oynaması umulmaktadır.

Kojenerasyonun temelinde güç üretimi yapan bir ısı makinesinin atık ısısından yararlanma vardır. Kojenerasyon, öncelikli ısı olmak üzere elektrik ve/veya mekanik enerjilerin bir arada üretilmesidir. (Sistemden doymuş buhar ve/veya sıcak su ve elektrik ve/veya mekanik enerji elde edilmesi işlemidir.). Üretim, gaz türbini veya motorun gücünden ve egzoz gazı veya soğutma sistemlerinin atık ısısından elde edilir. Kojenerasyon toplam sistem verimi %80-90 civarlarındadır. İlk yatırım gideri 2-3 yıl gibi çok kısa bir sürede geri ödenir. Temel olarak elektrik enerjisi üretimi işlemi, kullanılan primer yakıtın yanmasıyla, kimyasal enerjisinin mekanik enerjiye bu enerjinin de jeneratör yardımıyla elektrik enerjisine dönüşmesidir. Yanma ürünü olarak 400-500°C sıcaklıktaki egzoz gazından ve sistem soğutmasından elde edilen ısıların, ısı değiştiricilerinden geçirilerek buhar veya sıcak su elde edilmesidir [2].

Kojenerasyonda birinci amaç yakıt enerjisinden en yüksek oranda yararlanmaktır. Enerjiden yararlanma amacı, kojenerasyon santralinde bir yılda üretilen ısı ve elektrik enerjilerinin toplamının tüketilen yakıt enerjisine oranı olarak tanımlanır. Sadece elektrik üretilen santrallerde bu değer %25-40 arasındayken, kojenerasyon santrallerinde bu değer %90'ların üstüne çıkabilmektedir.

Kojenerasyon tesisleri günümüzde hızla yaygınlaşmaktadır. Bu tesislerle ilgili bir çok yayın ve araştırma yapılmaktadır. Chen ve arkadaşları [3], kojenerasyon sistemleri için bir algoritma geliştirmişler; kojenerasyon sistemlerinin planlanması, yakıt fiyatları ve üretilen elektriğin satış fiyatları gibi parametrelerin incelemesini yaparak kojenerasyon sistemlerinin ekonomik yönden daha verimli çalışması için gerekli araştırmalar yapmışlardır.

Bilgen [4], kojenerasyon sistemlerindeki gaz türbinlerinin mühendislik ve ekserji analizini yapmış ve bir gaz türbini modellemiştir. Termodinamiğin 1. ve 2. kanununu esas alarak ekserji analizi yapmıştır. Mühendislik analizi için fiyat ve geri ödeme periyotlarından faydalanmıştır. Modellenen gaz türbini için bir algoritma geliştirmiş, elektrik üretim yönteminin ve ısı oluşumunun analizleri yapılmıştır.

Malinowska ve Malinowski [5], bir ısı pompası ilave edilmiş küçük ölçekli bir kojenerasyon sisteminin ekserji verimi için bir çalışma yapmışlardır. Sıcak su ısıtıcısı ve elektrik enerjisi ile ısı üretiminin birleştirilmesi sonucu ortaya çıkan birleşik ısı ve güç sistemlerinin karşılaştırmalı analizini yaparak geleneksel sistem ve kojenerasyon sistemlerinin ekserji verimleri, bağlı ekserji verimlerini tanımlamışlardır.

Casella ve arkadaşları [6], kojenerasyon sistemlerinde ürün fiyatlarının azaltılması için bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada fiyat/ürün oranının ürün satış ve alışı üzerinde etkileri incelenmiştir. Kojenerasyon sistemlerinde kullanılan ürünlerin fiyat analizleri yapılarak en optimum çalışma şartları için en uygun yakıtın hangisi olduğu tartışılmıştır.

Marc ve arkadaşları [7], bir kojenerasyon ve bölgesel enerji sisteminin verim analizini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada elektriğin, ısıtmanın ve soğutmanın eş zamanlı olduğu kojenerasyon sistemini inceleyerek, ele alınan bölge için toplam performans ve verim analizi yapmışlardır. Sistemin enerji verimlerinin %83-94, ekserji verimlerinin %28-29 değerleri arasında olduğunu tespit etmişlerdir.

Marquez vd. [8], Monte Carlo'da bir kojenerasyon tesisinin türbin, jeneratör, ısı pompası gibi sistem elemanlarının optimum çalışması için gerekli şartları tespit etmişlerdir.

Cardona ve Piacentino [9], deniz suyunun tuzunun çıkarılması için tasarlanan bir kojenerasyon tesisinin optimum dizaynını yapmışlardır. İncelenen sistem için çeşitli formüller geliştirip, elde edilen değerleri bir matris sistemine taşıyarak çözüme gitmişlerdir. Analitik çözüm için bir bilgisayar programı hazırlanmış ve optimum çalışma şartlarına ulaşılmıştır.

Syred ve arkadaşları [10], kojenerasyon sistemlerindeki küçük gaz türbinlerinin biyokütle geri kazanımı için siklon gazı ve yanma olaylarını incelemişlerdir. Sistemdeki alkalilerin basınçla değişimi, sıvı ve gaz hallerinin sıcaklıkla değişimlerini inceleyerek yanma sonu gazı bileşenlerinin farklı yakıtlar için aldıkları değerleri tespit etmişlerdir.

Bayrak ve arkadaşları [11], şeker üretim aşamalarının enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Bu işlemi gerçekleştirmek için şeker üretiminin tüm aşamaları incelenmiş, özellikle şerbet üretim aşamasındaki ekserji kayıplarının fazla olduğunu görmüşlerdir. Bu aşamadaki verimin yüksek olmasını işletme aşamalarındaki buharlaşma, şerbet karışım sirkülasyonu, sıkıştırma gibi faktörlere bağlamışlardır. Üretim yöntemlerinin değiştirilmesiyle diğer aşamalardaki verimlerin yükseleceğini tespit etmişlerdir.

Özçelik [12], Çalışmakta olan bir sistem için enerji ve ekserji analizi yapmıştır. Başlangıçta sistem elemanları sistemin tam şeması üzerinde incelenmiş, daha sonra ekserji analizi için gerekli elemanlar tek olarak ele alınmıştır. Sonuçta incelenen sistem için maksimum enerji kaybının %30 'unun yanma odasında, %22' sinin buhar jeneratörü ısı geri kazanımı sisteminde, %12.4 'ünün bacada olduğu tespit edilmiştir. Bu tür güç sistemlerindeki verimleri arttırmak için donanım artışına gidilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

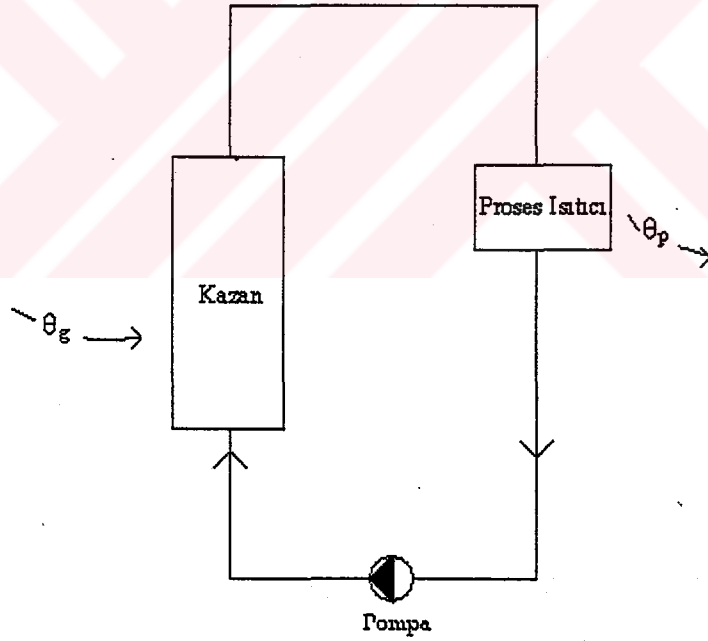
Aras [13], otomatik üretim yatırım modelini esas alan kojenerasyon olanaklarının geliştirilmesi ve düzenlenmesi ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Türkiye'nin 2010 yılındaki elektrik enerjisi talebi yaklaşık olarak 294 milyon kWh'dır. Bu değer 2020 yılında ise yaklaşık 556 milyon kWh'dır. 2001 yılında Türkiye'de üretilen elektrik enerjisinin 19 milyon kWh'i ve ısı enerjisinin 8 milyon kWh'i otomatik üretim sistemlerinde üretilmiştir. Görülmektedir ki artan enerji taleplerini karşılayabilmek için kojenerasyon tesisleri gibi sistemlerin ülkemizde daha yaygın olarak hayata geçirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada amaç İstanbul ili sınırları içerisindeki doğalgazla çalışan bir kojenerasyon tesisinin enerji ve ekserji analizini gerçekleştirmektir. Çalışmada, kojenerasyon sistemlerinin faydaları, uygulama alanları, bu tesislerde kullanılabilen yakıtlar vs. ele alınmış, incelenen sistemin birinci ve ikinci kanun verimi, yakıt verimi gibi parametreler tespit edilmiştir.

2. KOJENERASYON SİSTEMLERİ

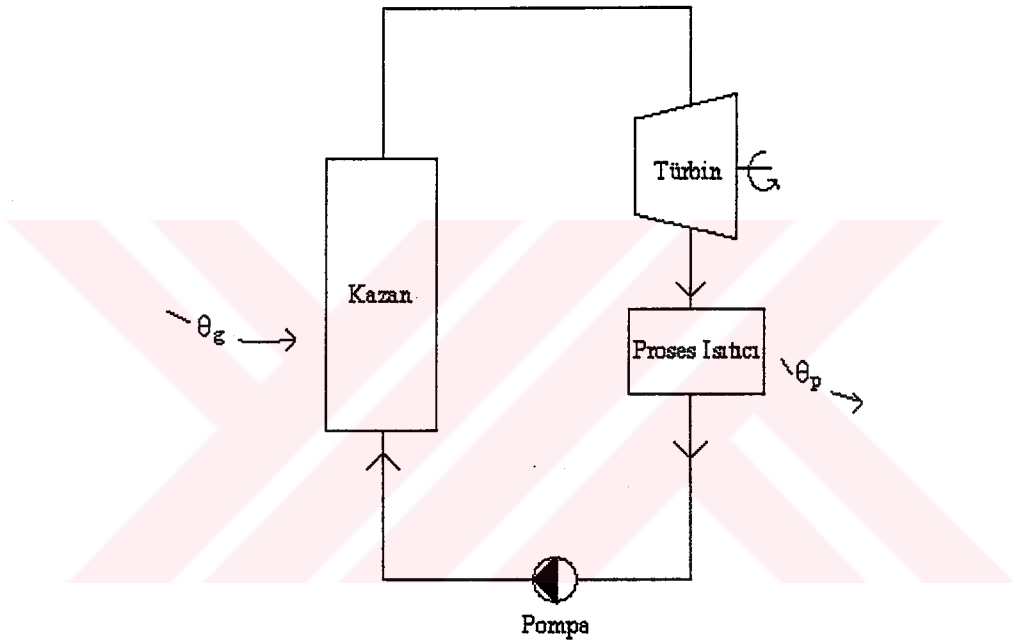
Tüm çevrimlerde amaç; aracı bir akışkana verilen ısının bir bölümünü işe dönüştürmektir. Isıl enerjinin geri kalan kısmı akarsulara, göllere, denizlere ve atmosfere atık ısı olarak verilir. Bunun nedeni çevreye verilen ısının başka bir amaçla kullanılamayacak kadar düşük sıcaklıkta olmasıdır.

Mühendislik sistemlerinin büyük bir bölümünde enerji gereksinimi ısı biçimindedir. Kimya, kağıt, petrol, çelik, gıda ve tekstil endüstrileri gibi bazı endüstrilerde ısı işlemler önemli bir yer tutar. Isıl işlemler için gerekli ısıya proses ısısı da denir. Bu endüstrilerde proses ısısı genellikle 5-7 atmosfer basınçları arasında ve 150-200 °C sıcaklıklar arasında su buharıyla sağlanır. Buharı oluşturmak için gerekli ısı kömür, sıvı yakıtlar, doğalgaz ve benzeri yakıtlar kazanda yakılarak elde edilir. Şekil 2.1’de basit bir proses ısı santrali görülmektedir.



Şekil 2.1. Basit Bir Proses Isı Santrali

Isıl işlemlerin yoğun olduğu endüstriler aynı zamanda büyük miktarda elektrik enerjisi kullanırlar. Bu bakımdan hem ekonominin hem mühendisliğin gereği olarak varolan iş potansiyellerini güç üretimi için kullanmak yerinde olur. Bu düşüncenin sonucu olarak, ısı işlem gereksinimlerini karşılarken elektrikde üreten santraller geliştirilmiştir. Bu santrallere birleşik ısı-güç santralleri denir. Birleşik ısı güç üretimi, ısı enerji ve elektrik gereksinimlerinin aynı enerji kaynağından karşılanmasıdır.



Şekil 2.2. İdeal Birleşik Güç Santrali

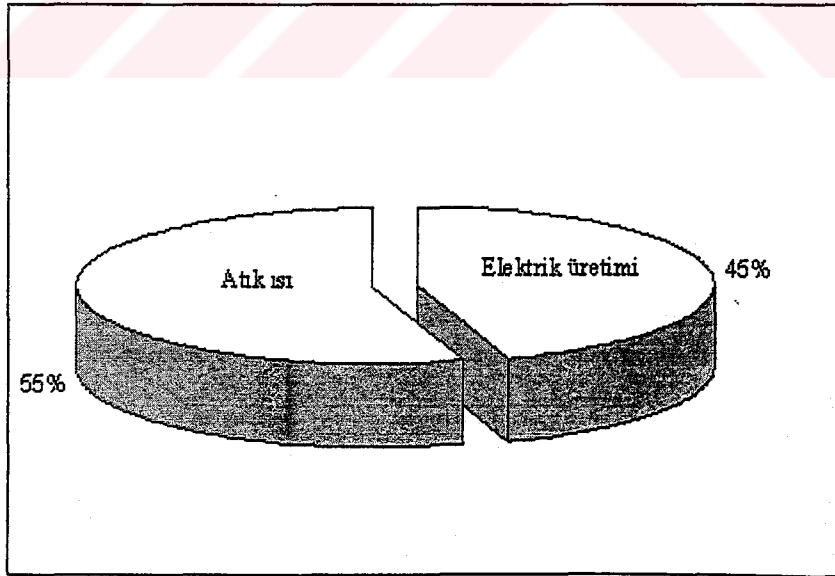
Bir birleşik güç santralinde, buhar türbini çevrimi (Rankine), gaz türbini çevrimi (Brayton) veya gaz buhar çevrimi kullanılabilir. Şekil 2.2'de ideal birleşik güç santrali görülmektedir. Şekil 2.2'deki buhar türbinli güç santralinde yoğunlaştırıcı olmadığından çevreye verilen atık ısı da yoktur. Yani kazanda buhara verilen tüm enerji elektrik enerjisine veya proses ısıya dönüşmektedir. Bu birleşik ısı güç santrali için enerjiden yararlanma oranı (EYO) denklem 2.1'deki gibi tanımlanmıştır.

$$EYO = \frac{\text{üretilen net g + proses ısı}}{\text{girilen ısı}} = \frac{W_{\text{net}} + Q_p}{Q_g} \quad (2.1.)$$

$$EYO = 1 - \frac{Q_\phi}{Q_g} \quad (2.2.)$$

Burada Q_ϕ yoğuşturucudan çevreye verilen ısıdır. Aynı zamanda Q_ϕ borulardan ve diğer elemanlardan çevreye verilen ısı geçişlerini de kapsamaktadır. Fakat bu kayıplar küçük olduklarından ihmal edilebilirler. şekil 2.2'deki ideal santralin enerjiden yararlanma oranı %100 dr. Bu değer gerçek santrallerde ise %70 civarlarındadır [14,15].

Genel olarak, birleşik ısı ve güç sistemlerinde sisteme verilen enerjinin %45'i elektriğe dönüştürülür. Geriye kalan %55'lik kısmı atık ısı olarak ortamdandır atılır. şekil 2.3'de bu oran görülmektedir.



şekil 2.3. Birleşik Isı ve Güç Sistemlerinde %100 Enerji Girdisi İçin Elektrik retim Yüzdesi

2.1. Kojenerasyon Sistemlerinin Tarihsel Gelişimi

Elektrik üretimine yönelik olan ve ülkemizde de yaygınlaştırılarak kullanılmak istenilen bu yeni teknoloji, ısı ve elektriği birlikte üretecek bileşik ısı - güç sistemleri yani kojenerasyon teknolojisi. Bu teknolojinin, ilk basit örnekleri yirminci yüzyılın ilk yarısında görülmüştür. Ancak ucuz yakıt döneminde ise terk edilmiştir. 1973-1979 petrol krizlerinin ardından geliştirilerek yeniden uygulanmaya konulmuştur

Kojenerasyon, yirminci yüzyılın başlarından itibaren, güç santrallerinin yerleşim birimlerinde kurulması ve bölge ısıtması yapılmasıyla başlamıştır. Bölge ısıtması, konutların ve işyerlerinin ısıtma, sıcak su ve proses ısılarının bir veya birkaç merkezden sağlanmasıdır. Bölge ısıtması, 1940'lı yıllarda yakıt fiyatlarının düşmesiyle çekiciliğini yitirmiştir. Ama 1970'li yıllarda yakıt fiyatlarının hızla yükselmesiyle bölge ısıtmasına ilgi dünya çapında yeniden uyanmıştır. Kojenerasyon ekonomik açıdan kazançlı olmuştur. Bunun sonucu olarak son yıllarda bu tür santrallerin kurulması hızlanmıştır. Kojenerasyon, merkezi ısıtma uygulamalarının yaygın olarak kullanıldığı ülkelerde daha erken gelişme ve kullanıma olanağı bulmuştur. Çünkü ABD'de binalar çok yüksek olduğundan sıcak su ile ısıtma yapılamamakta, bunun yerine alçak basınçlı buhar kullanılarak ısıtma yapılmaktadır. Bu yüzden merkezle kullanma yeri arasında yüksek basınçlı buhar tercih edilmiştir. Bu nedenle bileşik ısı - güç üreten merkezlerin yıllık verimi yüksek olmaktadır. Bu yüzyılın sonuna kadar ABD'de elektriğin %15'inin kojenerasyon tesislerinden sağlanması beklenmektedir. İngiltere'de 1945 yılından itibaren gelişen bölge ısıtması özellikle son 25 yıllık dönem içinde kojenerasyon sistemlerinin gelişmesi ile oldukça hızlı bir şekilde yaygınlaşmıştır. Fransa'da bölge ısıtması ile ilgili ilk büyük tesis Paris'te yapılmıştır ve buharlı olan bu sistem devamlı olarak gelişmekte olup, hem bileşik ısı-güç üreten merkezlerden hem de yalnız buhar üreten çöp yakma merkezleri tarafından beslenmektedir. Almanya'da ise bölgesel ısıtma uygulamaları için 1930'lardan sonra kaynar suya ve özellikle bileşik ısı - güç üretimine geçilmiştir. Merkezde ayrıca çöp yakan büyük kapasitedeki buhar kazanları da bulunduğu için işletme rantabilitesi yüksek olmaktadır. İskandinav ülkeleri bu tesisler açısından en önde gelmektedirler. Danimarka, İsveç, Finlandiya ve Norveç'te toplam binaların %30-80'i bu sistemle ısıtılmakta olup ısıtma merkezleri birleşik ısı - güç üretimi şeklinde düzenlenmiştir [16].

2.2. Kojenerasyon Sistemleri Uygulamalarının Ülkemiz ve Dünya İçin Sağladığı Yararlar

- Yüksek enerji çevrim verimi sayesinde, yılda 2 Milyon ton Fuel Oil Eşdeğeri yakıt tasarrufu sağlayarak piyasa şartlarında 360 Milyon dolar tasarruf yaptırmaktadır.
- Çevre dostu olması,
- 2000 MW Türbinli, 1500 MW Motorlu kojenerasyon sistemi ile ülkemizde bu güçte elektrik üretimi yapacak kömürlü santraller ile karşılaştırsak 1900 TE CO₂ (%50) Sera etkisi oluşturacak emisyon tasarrufu sağlanmıştır.
- Çok çeşitli yakıtlar kullanılabilmesi özelliği ile, sadece doğal gazı dayalı değil, diğer yakıtları da kullanarak, katma değer oluşturmaktadır.
- Tüketim bölgelerinin yanına kurulduklarından, iletim ve dağıtım hat kayıplarının olmaması özelliği ile, yılda 2.800.000 MWh elektrik enerjisi tasarruf edilmekte olup, yıllık maddi değeri 196 Milyon dolar olmaktadır.
- Ucuz ve kaliteli enerji üretimi özelliği ile, yatırımcılarına kojenerasyon sistemleri şebeke fiyatının yarısına enerjilerini üretme imkanı sağladıkları için dünya piyasalarında daha fazla rekabet edebilme imkanı vermektedir.
- Tüm dünyada her yıl şebeke santrallerinde üretilen elektrik enerjisinin, iletim ve dağıtım hatlarında oluşan kayıplardan dolayı, Almanya, İngiltere, Fransa ve İspanya'nın toplam enerji ihtiyaçlarına denk bir kısmı kaybedilmektedir.
- Dünyadaki termik güç santrallerinin verimlilik ortalaması %34'dür ve son kırk yıldır bu değer yükselmemektedir.
- Tüm dünyada düşük verim ve kayıplardan dolayı her yıl 400 Milyar dolar enerji sektöründe kaybedilmektedir.

- Bu sebeplerden dolayı, Hollanda, Danimarka ve Finlandiya gibi ülkelerde toplam enerji üretiminin %30'una kadar çıkan kojenerasyon sistemleri Kyoto Anlaşmasına taraf olmuş Avrupa Birliği içerisinde daha da önem verilerek kojenerasyonun payının hızla artırılması kararı alınmıştır. Ayrıca Amerikada da kojenerasyon sistemlerinin gelişmesi için çeşitli stratejiler geliştirilmiştir [17].

2.3. Kojenerasyon Sistemlerinin Kazançları, Yakıt Çeşitleri ve Uygulama Alanları

Kojenerasyon sistemleri günümüzde hızla yaygınlaşan sistemlerdendir. Bu sistemler gelişen dünyadaki artan enerji açığını önlemek ve atık enerjiden daha fazla yararlanmak için tasarlanmaktadır. Bu sistemlerin kazançları aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Ucuz ve kaliteli enerji üretimi, en az üretim ve işçilik kaybı.
- Yüksek enerji çevrim verimi.
- Çevre dostu olması, daha az CO₂, SO₂ ve NO_x emisyonu.
- Çok çeşitli yakıt kullanılabilmesi.
- Tüketim bölgelerinin yakınına kurulduklarından, iletim ve dağıtım hat kayıplarının en aza indirilebilmesi.
- Şebeke ile paralel çalışabildiklerinden, ihtiyaç fazlası ya da eksiği elektrik enerjisinin şebekeye satılabilmesi ya da şebekeden alınabilmesi.

2.3.1. Uygulama Alanları

Kojenerasyon sistemlerinin geniş bir uygulama alanı vardır. Kojenerasyon sistemlerinin uygulanabileceği yerlerden birkaçı maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır:

- Tekstil Fabrikaları
- Kağıt Fabrikaları
- Seramik Fabrikaları
- Kimya Fabrikaları
- Plastik Fabrikaları
- Gıda Fabrikaları
- Orman Ürünleri Fabrikaları
- Oteller
- Hastaneler
- Apartman ve Siteler
- Alışveriş Merkezleri
- Villalar
- İş Merkezleri
- Biyogaz ve Çöp Gazı Tesisleri

2.3.2. Kojenerasyon Sistemlerinde Kullanılan Yakıtlar

- Doğal Gaz
- LPG
- Fuel Oil
- Nafta
- Motorin
- Orumlsiyon
- Biyolojik Gazlar
- Ülkemizde Üretilebilecek Biyolojik Dizel Yakıtlar
- Ay çiçeği yağı
- Fındık yağı
- Zeytin Prinası
- Pamuk Çentiği
- Soya yağı

2.3.2.1. Ticari Olarak Bulunabilen Yakıt Seçeneklerinin Özellikleri ve Bugünkü Fiyat Seviyeleri

Gaz yakıtların motorlarda yakılabilmesinin en önemli kriteri metan sayısıdır. Arkasından kalorifik değer ve laminar alev hızı gelir. Gazların özellikleri Tablo 2.1' de verilmiştir.

Tablo 2.1. Kojenerasyon Sistemlerinde Kullanılan Bazı Yakıtların Kimyasal Özellikleri

Yakıt	Kompozisyon	Spesifik gravite (kg/Nm ³)	Alt ısı değeri (kWh/Nm ³)	Metan sayısı	Laminar alev hızı (cm/sn)
H ₂	hidrojen	0.0899	2.996	0	302
CH ₄	metan	0.717	9.971	100	41
C ₃ H ₈	propan	2.003	26	33	45
CO	karbon monoksit	1.25	3.51	75	24
Doğalgaz	CH ₄ =%88.5 C ₂ H ₆ =%4.7 C ₃ H ₈ =%1.6 C ₄ H ₁₀ =%0.2 N ₂ =%5	0.798	10.14	80	41
Arıtma gazı	CH ₄ =%65 CO ₂ =%35	1.158	6.5	135	27
Çöplük gazı	CH ₄ =%50 CO ₂ =%40 N ₂ =%10	1.274	4.98	150	20
Odun gazı	H ₂ =%7 CO=%17 C _n H _m =%5 N ₂ =%56 CO ₂ =%15	1.25	1.38	13	

Tablo 2.2 Kojenerasyon Sistemlerinde Kullanılan Bazı Yakıtların Fiyatları

	Doğalgaz	Propan	Motorin	F.oil 6
Isıl değeri (cal)	8250	11200	10200	9600
Birim fiyat	150 \$/m ³	300 \$/ton	317 \$/ton	105 \$/ton
Spesifik fiyat	0.016 \$/kWh	0.023 \$/kWh	0.027 \$/kWh	0.009 \$/kWh

2.3.2.1.1. Kojenerasyon Sistemlerinde Kullanılan Bazı Yakıtların Özellikleri

1. **Doğalgaz:** Kojenerasyonun ticari olarak bulunabilen tartışmasız temel yakıtıdır. Hem yanma özellikleri hem çevre dostu oluşu hem depolama gerektirmemesi hem de ekonomik açıdan en geçerli yakıttır.
2. **Propan:** %95 üzerinde saflık gerekliliği ithal edilmesini gerektirmektedir. Enerji üretimi amaçlı olarak ithalatı bazı firmalarca yapılmaktadır. Ancak çok düşük metan sayısı yüksek kalorifik değerine karşı motorlardaki üretimi aynı kapasitedeki gaz motoruna oranla %65 düzeyinde kalmaktadır. Bu üretimin verimsiz olması anlamında değil, spesifik yatırım maliyetinin artması şeklinde yorumlanmalıdır.
3. **Dizel:** Yanması en az problemli ve zararlı emisyonu en düşük likit yakıttır. Ancak fiyatı sebebiyle kojenerasyonda ana yakıt olarak kullanılması ekonomik olarak mümkün değildir. Ancak gaz kesintilerine karşı, eşzamanlı şebeke elektriği kesilmesinde kullanılmak üzere yedek yakıt olarak değerlendirilebilecek en uygun yakıttır.
4. **4 nolu Fuel-oil:** Bir diğer uygun likit yakıttır. Ancak emisyonlarında arıtma gerekmekte, fiyat açısından da yine ekonomik saymak mümkün olmamaktadır.
5. **6 nolu Fuel-oil:** Birçok yöremizde bulunabilirliği, ülkemizde zaman zaman üretim fazlası vermesi (ithalattan bağımsız olabilme) ve enerji üretiminde kullanılması durumunda devletten gördüğü teşvik nedeniyle en uygun yakıtlardan biri olmasına karşın, gaz ve katı atıklarının arıtılması ve bertaraf edilmesinde karşılaşılan problemler ve maliyetler dezavantajlı taraflardır.

2.4. Türkiye'deki Kojenerasyon Tesisleri

Tablo 2.3.a, b, c, d, e, f,g' de Türkiye'deki bazı kurulu kojenerasyon tesislerinin bilgileri yer almaktadır.

Tablo 2.3. Türkiye'deki Kojenerasyon Tesisleri [18]

TESİS ADI	TESİS YERİ	TAHRİK ÜNİTESİ	MAKİNA TİPİ	KULLANILAN YAKIT	ATIK ISI SİSTEMİ
Pirelli	Adapazarı	Gaz Türbini	1x GT 10	Doğalgaz	ABB STALL
Modern Karton	Çorlu	Gaz Türbini	1x GT 10	Doğalgaz	
Demirtaş K.Atık	Bursa	Gaz Motoru	5x 300 kW	Çöplük gazı	
BOO/Hakkari Mobile Power Plant	Hakkari	Dizel Motor	4x3MW+1x5MW	Fuel-oil No:6	
Teknik Emprime		Gaz Motoru	1x600kW	Doğalgaz	
Eskişehir Organize	Eskişehir	Gaz Türbini	1xLM5000	Doğalgaz	
Modern Enerji	Çorlu	Gaz Türbini	1xGT10B	Doğalgaz	Standart Fassel
Maxi Enerji	Silivri	Gaz-Dizel Motor	1x8MW	Doğalgaz+Diesel	
Ege Seramik	İzmir	Gaz Türbini	1xT60	Doğalgaz+Diesel+LPG	Tecno+BGS
Tüp Merserize	Çorlu	Gaz Türbini	1xT60	Doğalgaz +LPG	DESA
Doğuş Tekstil	Çorlu	Gaz Motoru	1x1020kW	Doğalgaz	
Pizza Tekstil	Güneşli	Gaz Motoru	1x1020kW	Doğalgaz	
Tüp Merserize	Çorlu	Gaz Motoru	1x1020kW	Doğalgaz	

Tablo 2.3.a. Türkiye’deki Kojenerasyon Tesisleri (devam)

TESİS ADI	TESİS YERİ	TAHRİK ÜNİTESİ	MAKİNA TİPİ	KULLANILAN YAKIT	ATIK ISI SİSTEMİ
Henkel	Gebze	Gaz Motoru	1x1020kW	Doğalgaz	
Sarkuysan	Gebze	Gaz Motoru	3x3600kW	Doğalgaz	
Nuryıldız Tekstil	Çorlu	Gaz Motoru	1x768kW	Doğalgaz	
Atlas Halı	Çorlu	Gaz Motoru	1x1020kW	Doğalgaz	
İstanbul Demirçelik	İstanbul	Gaz Motoru	2x3600kW	Doğalgaz	
Bahariye Mensucat	Güneşli	Gaz Motoru	1x1020kW	Doğalgaz	
Uçal Dönüşen Kağıt		Gaz Motoru	1x1020kW	Propan	
Aydın Tekstil	İkitelli	Gaz Motoru	1x1020kW	Doğalgaz	
Yeni Tekstil		Gaz Motoru	1x800kW	Doğalgaz	
Nuryıldız Tekstil	Çorlu	Gaz Motoru	2x1400kW	Doğalgaz	Clayton
Tübaş Tekstil		Gaz Motoru	1x1400kW	Doğalgaz	
Yurtbay Seramik		Gaz Türbini	3xKB-5	Doğalgaz	Tekno
Rolis Royce		Dizel Motor	2x6000kW	Fuel-oil No:6	
MED Union Containers		Dizel Motor	1x16V28/32H	Fuel	Danstoker
Ortadoğu Rulman Sanayi		Dizel Motor	1+1x18V28/32H	Fuel	Danstoker
Samur Halıları San.Tic.A.Ş.		Dizel Motor	2x18V28/32H	Fuel	Danstoker
İsparta Mensucat A.Ş.	İsparta	Dizel Motor	3x18V28/32H	Fuel	Danstoker
Efes Pilsen		Dizel Motor	1x18V28/32H	Fuel	Danstoker
Akbaşlar Tekstil		Dizel Motor	1+1x18V28/32H	Fuel	Danstoker

Tablo 2.3.b. Türkiye’deki Kojenerasyon Tesisleri (devam)

TESİS ADI	TESİS YERİ	TAHRİK ÜNİTESİ	MAKİNA TİPİ	KULLANILAN YAKIT	ATIK ISI SİSTEMİ
Çolakoğlu/Ova Elektrik		Gaz Türbini	2xFRM9E	Doğalgaz	ELIN
Ereğli Demirçelik	Ereğli	Gaz Türbini	2xLM6000	Doğalgaz	ELIN
AK EN	Çerkezköy	Gaz Türbini	FRM6	Doğalgaz	DESA
DOĞA ENERJİ	Bahçeşehir/İst	Gaz Türbini	3xLM6000	Doğalgaz	DESA
AK EN	Bozöyük	Gaz Türbini	2xFRM6	Doğalgaz	GAMA B&W
EnerjiSA	İzmit	Gaz Türbini	2xFRM6	Doğalgaz	DESA+GAMA
Arçelik,6.5MW	Çayırova	Motor	1x18V32LNGD	Gas&HFO	
Arçelik,6.5MW	Eskişehir	Motor	1x18V32LNGD	Gas&HFO	
Şişecam,12.2MW	Çayırova	Motor	2x18V32DF	Gas&HFO	
Denizli Çimento,15.1MW	Denizli	Motor	1x16V46	HFO	
Çinkur,30MW	Kayseri	Motor	3x18V38	HFO	
Amylum Nişasta,6.5MW	Adana	Motor	1x12ZV40	HFO	
Amylum Nişasta,0.75MW	Adana	Motor	1x6S20	HFO	
Ener Power-1, 26MW	Van	Motor	4x18V32LN	HFO	
Ener Power-2, 26MW	Van	Motor	4x18V32LN	HFO	
K.E.Y.Enerji-1, 45.5MW	Silopi	Motor	7x18V32LN	HFO	
K.E.Y.Enerji-2, 32.5MW	Silopi	Motor	6x18V32LN	HFO	
MOSB, 54.3MW	Manisa	Motor	3x18V46	HFO	
Gülle Tekstil, 6.1MW	Çorlu	Motor	1x18V32DF	Gas&HFO	

Tablo 2.3.c. Türkiye’deki Kojenerasyon Tesisleri (devam)

TESİS ADI	TESİS YERİ	TAHRİK ÜNİTESİ	MAKİNA TİPİ	KULLANILAN YAKIT	ATIK ISI SİSTEMİ
DUSA, 5 MW	İzmit	Motor	1x18V280	HFO	
Bil Enerji, 26MW		Motor	4x18V32LN	HFO	
Koni, 26MW	Siirt	Motor	4x18V32LN	HFO	
Rasa, 33.8 MW	Mardin	Motor	3x18V38	HFO	
Aksa	Hakkari	Motor	4x18V32LN	HFO	
Akteks, 13MW	Gaziantep	Motor	2x18V32LN	HFO	
Gama	Kırakkale	Motor	13x18V38	HFO	
Birlik Enerji	Denizli	Dizel Motor	2x18.5MWe	Fuel-oil No:6	
Sanko	Gaziantep	Dizel Motor	4x8.4MWe	Fuel-oil No:6	
Birko Koyunlu	Niğde	Dizel Motor	3x5.5MWe	Fuel-oil No:6	
Gülşan Enerji	Gaziantep	Dizel Motor	2x12.5MWe	Fuel-oil No:6	
Habaş	Aliğa	Dizel Motor	2x18.5MWe	Fuel-oil No:6	OKA Enerji
Habaş	Bilecik	Dizel Motor	1x18.5MWe	Fuel-oil No:6	OKA Enerji
Aksen	Gaziantep	Dizel Motor	2x10.5MWe	Fuel-oil No:6	
Ankara Enerji	Esenboğa	Dizel Motor	7x7.45MWe	Fuel-oil No:6	
Pasiner Permas JV.	Batman	Dizel Motor	4x18.4MWe +3x15MWe	Fuel-oil No:6	
Baydemirler	İstanbul	Gaz Motoru	3x1033kW	Doğalgaz	CLAYTON APROVİS
Eczacıbaşı Baxter	İstanbul	Gaz Motoru	1x1033kW	Doğalgaz	CLAYTON
Mavi Jeans	Çerkezköy	Gaz Motoru	1x1365kW	Doğalgaz	APROVİS
Bil Enerji	Ankara	Gaz Türbini	1XRB211	Doğalgaz	GAMA B&W
BOO/Mobile Power Plant		Gaz Türbini	2x5MW	Ham Petrol	
BOTAŞ	Pendik	Gaz Motoru	800kW	Doğalgaz	

Tablo 2.3.d. Türkiye’deki Kojenerasyon Tesisleri (devam)

TESİS ADI	TESİS YERİ	TAHRİK ÜNİTESİ	MAKİNA TİPİ	KULLANILAN YAKIT	ATIK ISI SİSTEMİ
AK EN	Yalova	Gaz Türbini	LM2500	Doğalgaz+ Nafta	Alarko Alamsas
BİS Enerji	Bursa	Gaz Türbini	2xLM5000+ FRM6	Doğalgaz	Macchi
Koç Enerji	Bursa	Gaz Türbini	2xLM6000	Doğalgaz	
Zorlu Enerji	Bursa	Gaz Türbini	2xLM2500	Doğalgaz	
Atatürk Organize	İzmir	Gaz Türbini	2xLM6000	Nafta	
Nuh Çimento		Gaz Türbini	LM2500	Doğalgaz	
Zorlu	Çerkezköy	Gaz Türbini	2xLM2500	Doğalgaz	
Sönmez Flament		Gaz Motoru	2x2000kW	Doğalgaz	
Hayat Kimya	Yenibosna	Gaz Motoru	1x1003kW	Doğalgaz	Hoval
Kemerburgaz Çöplük Santrali	Kemerburgaz	Gaz Motoru	4x1006kW	Çöplük Gazı	
Ambarlı Kompresör İst.	Ambarlı	Gaz Motoru	1x803kW	Doğalgaz	
Asil Gıda	İzmit	Gaz Motoru	2x1048kW	Doğalgaz	Hoval
Pak Holding Gıda	Düzce	Gaz Motoru	2x1048kW	Doğalgaz	Hoval
Adana Arıtma Tesisi	Adana	Gaz Motoru	1x803kW	Arıtma Gazı	
Altınmarka Gıda	Hadımköy	Gaz Motoru	2x1048kW	Doğalgaz	Aprovis
Siemens	Kartal	Gaz Motoru	2x550+ 1x1000kW	Doğalgaz	
Beybo Enerji	Çorlu	Gaz Türbini	1xT60	Doğalgaz	DESA
Bilkent Enerji	Ankara	Gaz Türbini	1xT60	Doğalgaz	DESA
Modern Karton	Çorlu	Gaz Türbini	2xM100	Doğalgaz+LPG	DESA
Can Tekstil	Çorlu	Gaz Türbini	1xT60	Doğalgaz	DESA
Söktaş	Söke	Gaz Türbini	1xT60	LPG	DESA

Tablo 2.3.e. Türkiye'deki Kojenerasyon Tesisleri (devam)

TESİS ADI	TESİS YERİ	TAHRİK ÜNİTESİ	MAKİNA TİPİ	KULLANILAN YAKIT	ATIK ISI SİSTEMİ
İSKO	İnegöl	Gaz Türbini	2xT60	Doğalgaz+LPG	BLOHM VOSS/ISISAN
MOPAK	İzmir	Gaz Türbini	1xT60	LPG+Nafta	DESA
Edip İplik	Lüleburgaz	Gaz Türbini	1xT60	Doğalgaz	DESA
Ege Seramik	İzmir	Gaz Türbini	1xC50	LPG+Nafta	Tecneco
Goodyear	İzmir	Gaz Türbini	1xC5060	Doğalgaz+LPG	
Toprak Seramik	Eskişehir	Gaz Türbini	2xT60	Doğalgaz	Tecneco
Camsan Ağaç San	Ordu	Gaz Türbini	1xT60	LPG	Direkt Kurutma
Kartonsan	İzmit	Gaz Türbini	4xT60	Doğalgaz	DESA
Kastamonu Ağaç	Gebze	Gaz Türbini	1xT60	Doğalgaz	TETA
AK EN	Yalova	Gaz Türbini	1xMF111-B	Doğalgaz+ Nafta	GAMA&B&W
Dentaş	Denizli	Gaz Türbini	1xT60	LPG+Nafta	ABB- ALAMSAS
AK EN	Alaplı	Gaz Türbini	1xT70	Doğalgaz	DESA
Pakmaya	İzmit	Gaz Türbini	1xT60	Doğalgaz+LPG	DESA
Asil Gıda	Düzce	Gaz Türbini	1xT60	Doğalgaz+LPG	DESA
Altinyıldız	Güneşli	Gaz Türbini	1xT60	Doğalgaz+LPG	AALBORG
Orta Anadolu	Kayseri	Gaz Türbini	2xT60	LPG	AALBORG
Hayat Kimya	İzmit	Gaz Türbini	1xT60	Doğalgaz+LPG	DESA
Goodyear	Adapazarı	Gaz Türbini	2xT60	LPG	AALBORG+ NEBRASKA BOİLER
Toros Enerji	Mersin,Adana	Gaz Türbini	2xT60	Nafta	AALBORG+ ABB/OKA
Yıldız Sunta	İzmit	Gaz Türbini	1xT60	Doğalgaz+LPG	Direkt Kurutma

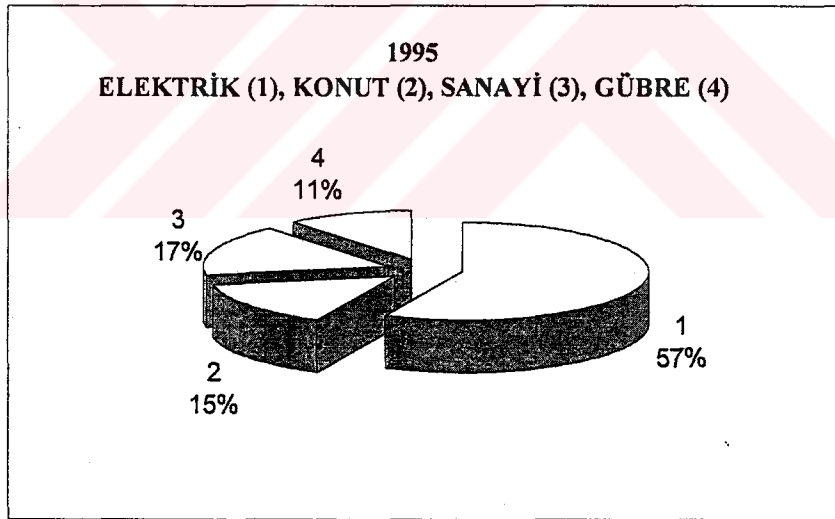
Tablo 2.3.f. Türkiye'deki Kojenerasyon Tesisleri (devam)

TESİS ADI	TESİS YERİ	TAHRİK ÜNİTESİ	MAKİNA TİPİ	KULLANILAN YAKIT	ATIK ISI SİSTEMİ
Menderes Tekstil	Denizli	Gaz Türbini	2xT60	Nafta	OMNICAL
Ak Enerji		Gaz Türbini	10xT60	Doğalgaz+Nafta	OMNICAL
Mensa Tekstil Sanayi		Gaz Türbini	2xT60	Nafta	OMNICAL
Kastamonu Ağaç	Gebze	Gaz Türbini	1xT60	Doğalgaz+LPG	Direkt Kurutma
Halkalı Kağıt	Halkalı	Gaz Türbini	1xT60	Doğalgaz+LPG	OMNICAL
Termal Seramik	Bozöyük	Gaz Türbini	1xC50	Doğalgaz+LPG	Tecneco
Çamsan MDF	Ordu	Gaz Türbini	1xT60	LPG+Diesel	OMNICAL
Şahinler Enerji	Çorlu	Gaz Türbini	2xTornado	Doğalgaz	AALBORG
Yalova Elyaf	Yalova	Gaz Türbini	3xTyphoon	Doğalgaz	STANDART-KESSEL+ AALBORG
Trakya İplik	Çerkezköy	Gaz Türbini	1xTyphoon	Doğalgaz	AALBORG
Starwood	Bursa	Gaz Türbini	3xTornado	Doğalgaz	GEA
Zorlu Tekstil	Çorlu	Gaz Türbini	2xTempest	Doğalgaz	DESA
CEFLA Kalebodur		Gaz Türbini	3xTemplest	Doğalgaz	CEFLA
Ak Enerji		Gaz Türbini	10xTyphoon	Doğalgaz+Nafta	AALBORG
B.S. Katı Atık	Ankara	Gaz Motoru	2x1500kW	Aritma gazı	
BOSEN Enerji	Bursa	Gaz Türbini	1x34MW	Doğalgaz	
Çetinkaya Mensucat		Dizel Motor	3x18V28/32H	Fuel	Danstoker
Arenko, 12.2MW	Denizli	Motor	2x18V32LN	HFO	
AK EN	Çerkezköy	Gaz Türbini	LM2500	Doğalgaz	Alarko Alamsas
Akın Tekstil	Çorlu	Gaz Türbini	1xT60	Doğalgaz	DESA

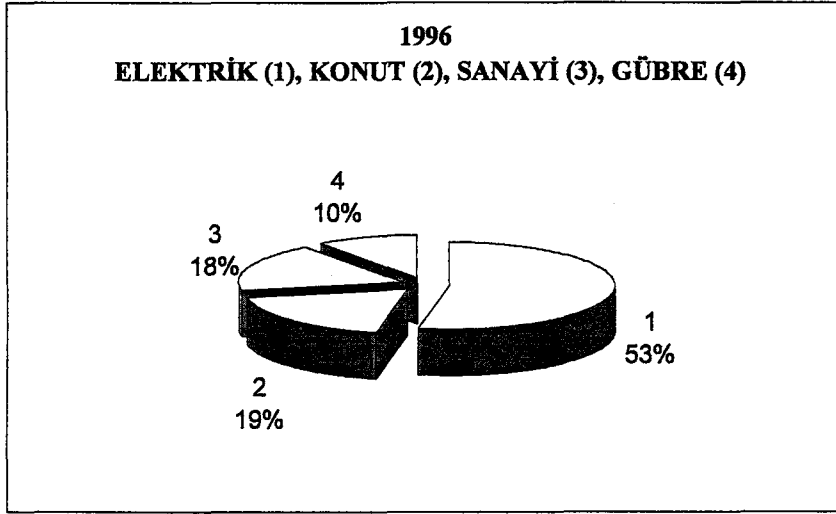
Tablo 2.3.g. Türkiye’deki Kojenerasyon Tesisleri (devamı)

TESİS ADI	TESİS YERİ	TAHRİK ÜNİTESİ	MAKİNA TİPİ	KULLANILAN YAKIT	ATIK ISI SİSTEMİ
Camiş Enerji	Trakya	Gaz Türbini	2xM100	Doğalgaz	DESA
Ülker Pendik Nişasta	Kartal	Gaz Türbini	2xT60	Doğalgaz+LPG	OMNICAL

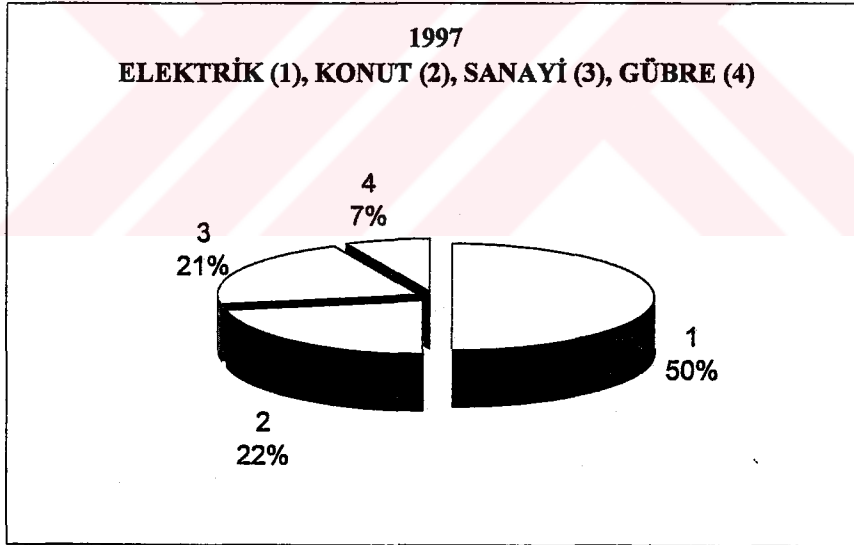
Tablo 2.3.a, b, c, d, e, f, g’deki kojenerasyon tesislerinin büyük bir çoğunluğunun yakıt olarak doğalgaz kullandıkları görülmektedir. Bu kullanım fazlalığı doğalgazın diğer yakıtlara oranla daha ekonomik ve çevreci olduğunu göstermektedir. Türkiye’de doğalgaz genel olarak dört ayrı alanda kullanılmaktadır. Bu alanlar elektrik, konut, sanayi ve gübre alanlarıdır [19]. Şekil 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, ve 2.8’de bu alanların yıllara göre dağılımı görülmektedir. Şekil 2.9’da ise 2010 yılı için Türkiye’nin tahmini doğalgaz kullanım talebi görülmektedir.



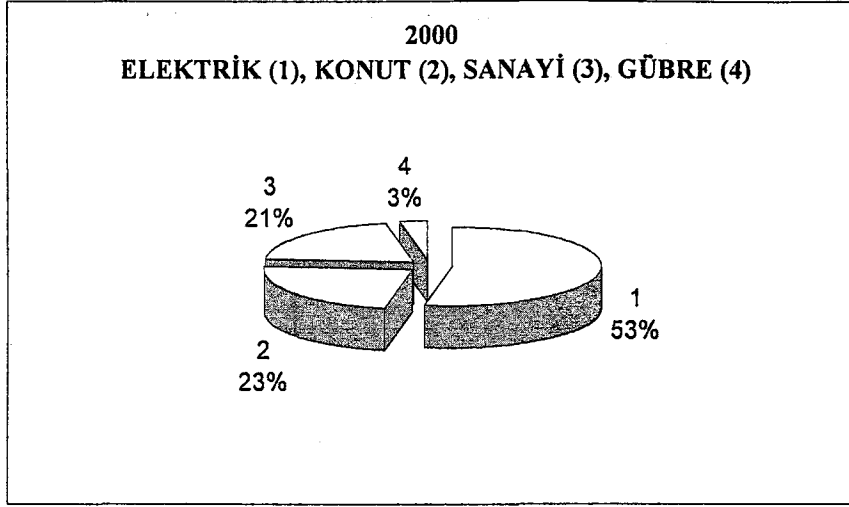
Şekil 2.4. Türkiye’de 1995 Yılı Doğalgaz Kullanımı



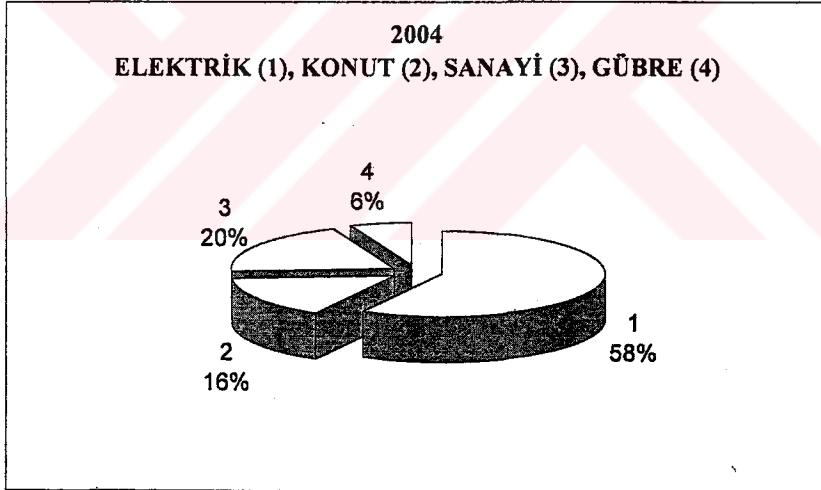
Şekil 2.5. Türkiye’de 1996 Yılı Doğalgaz Kullanımı



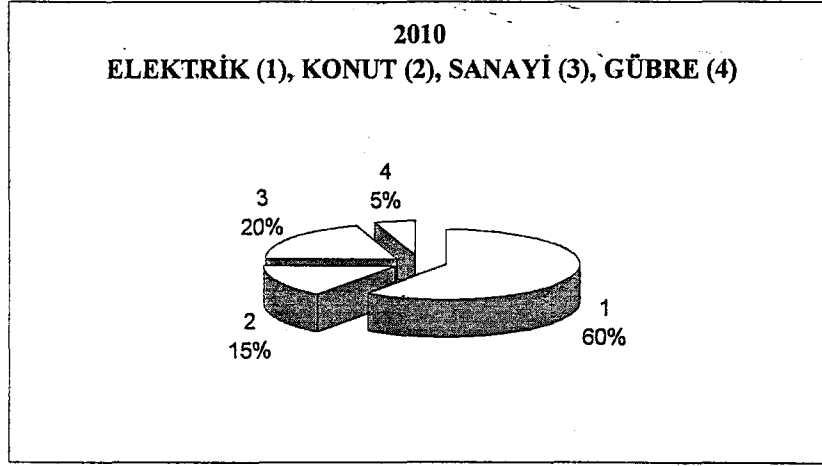
Şekil 2.6. Türkiye’de 1997 Yılı Doğalgaz Kullanımı



Şekil 2.7. Türkiye’de 2000 Yılı Doğalgaz Kullanımı



Şekil 2.8. Türkiye’de 2004 Yılı Doğalgaz Kullanımı



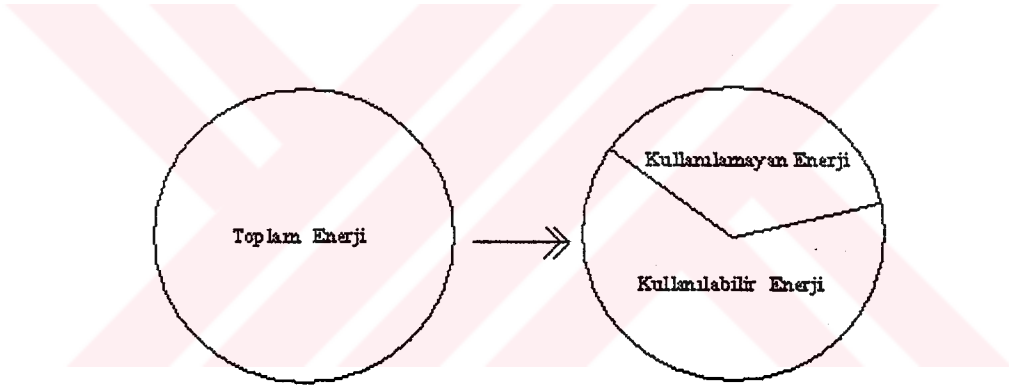
**Şekil 2.9. Türkiye'nin 2010 Yılı Tahmini
Doğalgaz Kullanımı Talebi**

Yıllara göre dağılıma bakıldığında elektrik ve sanayi alanında doğalgaz kullanımının gittikçe arttığı, konutlarda ve gübre alanında ise kullanımın giderek azaldığı görülmektedir. Burada dikkat edilecek bir hususta Türkiyede kullanılan doğalgazın %60 gibi büyük bir bölümünün elektrik alanında kullanılmasıdır. Dolayısıyla Türkiye'deki doğalgaz rezervlerinin yok denecek kadar az olması sebebiyle gelecek yıllarda enerji sektöründe dışa bağımlı bir ülke olabileceğimiz tehlikesini göz önünde bulundurmak gerekir. Eğer şimdi uygun olan doğalgaz fiyatları gelecekte tıpkı petrol fiyatları gibi anormal rakamlara yükselirse sanayi alanında yapılan bu yatırımların ülke ekonomisine ekonomik yönden fayda değil zarar getireceği açıktır.

3. AÇIK SİSTEMLER İÇİN KÜTLE-ENERJİ-EKSERJİ DENGESİ EŞİTLİKLERİ

Termodinamik işlemlerin analizinde ve termik sistemlerin optimizasyonlarında termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlarını birlikte değerlendirerek gerekli analizler sıhhatli bir şekilde yapılabilir. Birinci kanun enerji dengesi, ikinci kanun ise tersinmezlik, entropi üretimini ve daha ileri bir aşamada ekserji analizini yapar. Özellikle ısı sistemlerinin optimizasyonunda ekserji analizi etkili bir yöntemdir. Ekserji yani kullanılabilir enerji sistem bazında değerlendirilerek mekanik işin ekserjisi, ısıya ekserjisi, sisteme giren ve sistemden çıkan madde ekserjisi önemli birer parametre olarak dikkate alınır.

Bir sistemde toplam enerji, kullanılabilir enerji ve kullanılamayan enerji olarak ikiye ayrılır. Bu durum şekil 3.1’de görülmektedir.



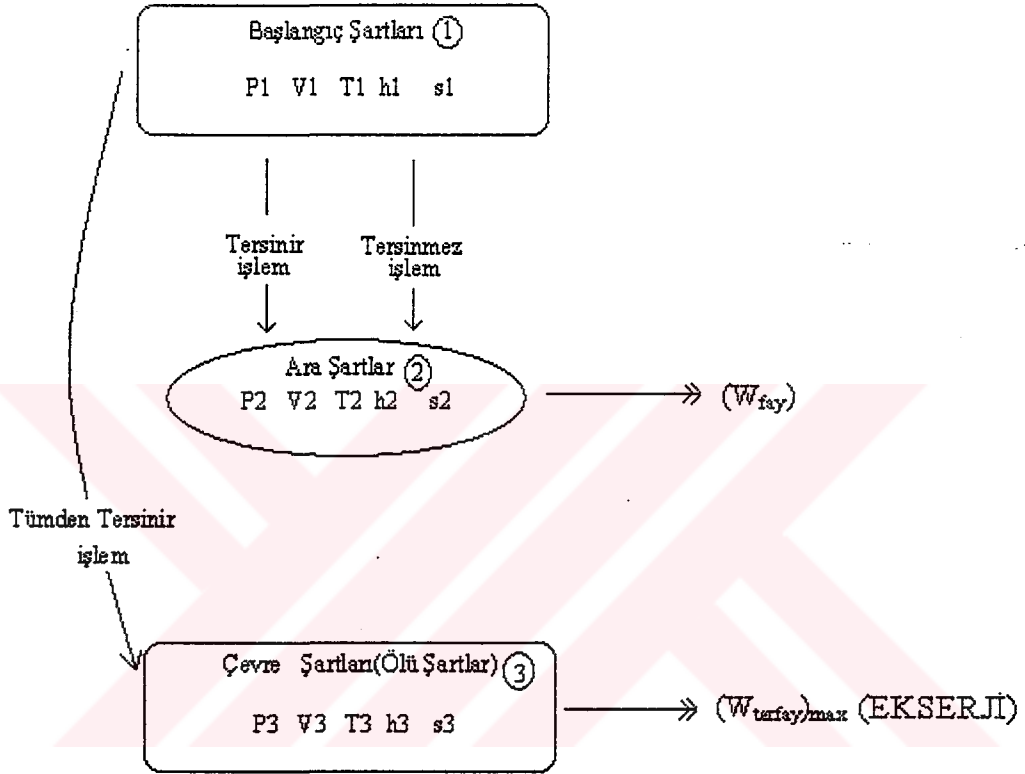
Şekil 3.1. Enerji Dağılımı

Kullanılabilir enerji, sistemdeki her türlü elde edilen faydalı ısı, iş ve faydalı enerjilerin toplamıdır. Kullanılamayan enerji ise tersinir bir ısı makinesiyle bile işe dönüştürülemeyen enerjidir [14].

Herhangi bir açık sistem için ekserji analizi yapılacağı zaman birinci ve ikinci kanun ifadeleri birlikte değerlendirilir. Sistemin çevre şartlarında denge hali esas alınarak faydalı iş, tersinir faydalı iş ifadelerinden faydalanılarak ekserji ifadelerine varılabilir. SASA sistemlerinde başlangıç şartlarından çevre şartlarına (ölü şartlar) tümünden tersinir olarak ulaşılabilirse bu durumda elde edilen maksimum işe tersinir faydalı iş veya ekserji denir.

Eğer sistemde başlangıç şartlarından ara şartlara tersinir veya tersinmez olarak ulaşılabilirse bu durumda faydalı işe ulaşılır.

Şekil 3.2' de SASA sistemlerinde başlangıç şartlarından çevre şartlarına ve ara şartlara ulaşıldığında elde edilebilecek faydalı iş ve tersinir faydalı iş gösterilmiştir.



Şekil 3.2. SASA Sistem İçin Tersinir ve Tersinmez İşlemler

3.1. Açık Sistemler İçin Tersinir Faydalı İş

Açık sistemler için genel enerji denkliği şekil 3.3'te görülmektedir. Sisteme verilen ısı, sisteme giren debi, kinetik enerji, potansiyel enerji, oluşan ısı, elde edilen iş, sistemden çıkan debi, kinetik enerji ve potansiyel enerji gibi değerler genel olarak eşitlik 3.1'deki gibi yazılabilir.

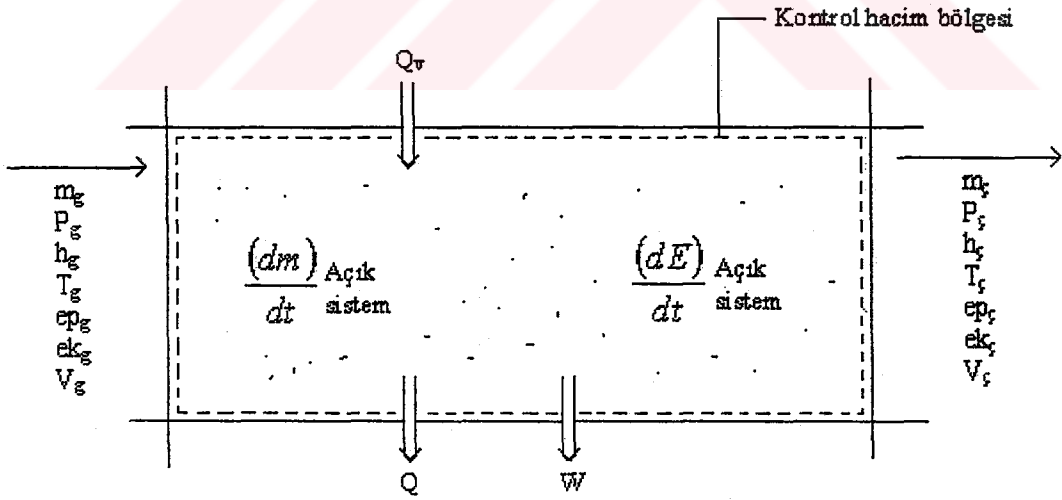
$$(dQ)_{SASA} - (dW)_{SASA} + \Sigma m_g(ek+ep+...)_{giren} - \Sigma m_c(ek+ep+...)_{çıkan} = \frac{(dE)_{SASA}}{dt} \quad (3.1)$$

Sistemde ısı alışverişinin olmadığını (Adyabatik) kabul edersek,

$$dQ = 0$$

Ayrıca enerji değişimlerini ihmal edersek,

$$\frac{(dE)_{SASA}}{dt} = 0 \text{ olur.}$$



Şekil 3.3. Açık Sistemlerde Kontrol Hacim Bölgesi İçin Enerji Denkliği

Dolayısıyla faydalı iş;

$$(W_{fay})_{SASA} = \sum m_g \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 \cdot s \right)_{giren} - \sum m_c \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 \cdot s \right)_{çıkan} - T_0 \cdot dS_{\dot{u}} \quad (3.2)$$

olarak elde edilir. Üretilen entropi $dS_{\dot{u}}$;

$$dS_{\dot{u}} = (S_c - S_g) + \frac{Q_{\text{çevre}}}{T_{\text{çevre}}}$$

şeklinde elde edilir.

Tersinir faydalı iş durumunda $dS_{\dot{u}}$ çok küçük bir değer alacağından ($dS_{\dot{u}} \Rightarrow 0$) tersinir faydalı işe ulaşabiliriz. O halde açık sistemler için tersinir faydalı iş;

$$(W_{terf})_{SASA} = \sum m_g \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 \cdot s \right)_{giren} - \sum m_c \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 \cdot s \right)_{çıkan} \quad (3.3)$$

olarak elde edilir. Kinetik ve potansiyel enerji değişimlerini de ihmal edersek ($ek+ep \Rightarrow 0$) tersinir faydalı iş 3.4 eşitliğindeki gibi elde edilir.

$$(W_{terfay})_{SASA} = m_g [(h_g - h_c) - T_0 (s_g - s_c)] \quad (3.4)$$

Bu eşitliği birim kütle başına yazarsak;

$$(w_{terfay})_{SASA} = (h_g - h_c) - T_0 (s_g - s_c) \quad (3.5)$$

eşitliği elde edilmiş olur. Bu durumda açık sistemler için tersinmezlik miktarı;

$$I = (w_{terfay})_{SASA} - (w_{fay})_{SASA} \quad (3.6)$$

şeklinde elde edilir.

3.2. Açık Sistemler İçin Ekserji İfadeleri

(3.7), (3.8), (3.9), (3.10) ve (3.11) eşitliklerinde açık sistemler için genel formda ekserji denklemleri verilmiştir.:

Genel Ekserji

$$X_{SASA} = (w_{terfay})_{SASA} = m [(h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0)] \quad (3.7)$$

Burada 1 indisi sistemin başlangıç şartını, 0 indisi sistemin çevre şartını (ölü şartlar) ifade etmektedir.

Isının Ekserjisi

$$XQ = \eta_{th} \Sigma Q_g = (1 - \frac{T_0}{T_k}) \Sigma Q_g \quad (3.8)$$

Kinetik Enerjinin Ekserjisi

$$XKE = \frac{V^2}{2} \quad (3.9)$$

Potansiyel Enerjinin Ekserjisi

$$XPE = g.z \quad (3.10)$$

Kütlenin Ekserjisi

$$X_{KÜTLE} = m.\Psi \quad (3.11)$$

$$\Psi = h - h_0 - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + g.z + \dots \quad (3.12)$$

olarak verilebilir.

Herhangi bir sistem için en genel bazda ekserji dengesi denklemi eşitlik 3.13’de verilmiştir.

$$XQ_{NET}-XW+X_{GİREN KÜTLE}-X_{ÇIKAN KÜTLE}-X_{KAYIP} = \frac{(\Delta X)_{sistem}}{dt} \quad (3.13)$$

Burada net ısıнын ekserjisi;

$$XQ_{NET} = XQ_{GİREN}-XQ_{ÇIKAN} = \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \Sigma Q_g \quad (3.14)$$

şeklinde yazılabilir.

XW ifadesi yerine W_{fay} ifadesini kullanabiliriz. Eşitliğin sağ tarafını aynı şekilde

$$\frac{(\Delta X)_{sistem}}{dt} = (X_{GİREN}-X_{ÇIKAN})_{sistem} \quad (3.15)$$

yazabiliriz. Kütlenin ekserjisini;

$$X_{GİREN KÜTLE}-X_{ÇIKAN KÜTLE} = m (\Psi_{GİREN}-\Psi_{ÇIKAN}) \quad (3.16)$$

şeklinde yazabiliriz. Dolayısıyla 3.13 eşitliğini yeniden düzenlersek;

$$\left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \Sigma Q_g - W_{fay} + m. (\Psi_{GİREN}-\Psi_{ÇIKAN}) - X_{KAYIP} = (X_{GİREN}-X_{ÇIKAN})_{sistem} \quad (3.17)$$

3.17 eşitliği herhangi bir sistem için en genel bazda ekserji denklemdir. Açık sistemler için (SASA) bu denklği yeniden düzenlersek 3.18 eşitliğine ulaşırız.

$$XQ_{NET}-XW+X_{GİREN KÜTLE}-X_{ÇIKAN KÜTLE}-X_{KAYIP} = 0 \quad (3.18)$$

3.18 eşitliğini daha açık formda yazarsak;

$$(1 - \frac{T_0}{T_k}) \Sigma Q_g - W_{fay} + m(\Psi_{GİREN} - \Psi_{ÇIKAN}) - X_{KAYIP} = 0 \quad (3.19)$$

ifadesi elde edilmiş olur. Burada kayıp ekserji miktarı:

$$X_{KAYIP} = I = T_0 \cdot dS_{\text{ü}} = w_{\text{terfay}} - w_{fay} \quad (3.20)$$

3.3. Termodinamik Sistemler İçin Birinci ve İkinci Kanun Verimi

Tüm sistemler için genel olarak birinci kanun verimi denildiğinde akla ilk gelen oran kazanç/emek oranıdır. Yani sisteme verilen herhangi bir emeğe karşı (ısı, güç, enerji vs.) elde edebildiğimiz kazançtır. Dolayısıyla birinci kanun verimi eşitlik 3.21'deki gibidir.

$$\eta_I = \frac{\text{kazanç}}{\text{emek}} = \frac{W_{\text{net}}}{\Sigma Q_g} = \frac{\text{elde edilen net iş}}{\text{sisteme verilen ısı (veya iş)}} \quad (3.21)$$

elde edilen net işi; ısı farkları şeklinde yazarsak

$$W_{\text{net}} = \Sigma Q_g - \Sigma Q_{\text{ç}} \quad (3.22)$$

3.22 ifadesini 3.21 eşitliğinde yerine yazarsak birinci kanun verimi;

$$\eta_I = \frac{W_{\text{net}}}{\Sigma Q_g} = 1 - \frac{Q_{\text{ç}}}{Q_g} \quad (3.23)$$

Aynı şekilde ikinci kanun verimi de sistemin son halindeki amaçladığımız enerjilerin sisteme verdiğimiz ilk haldeki kullanılabilir enerjilerle oranına eşittir.

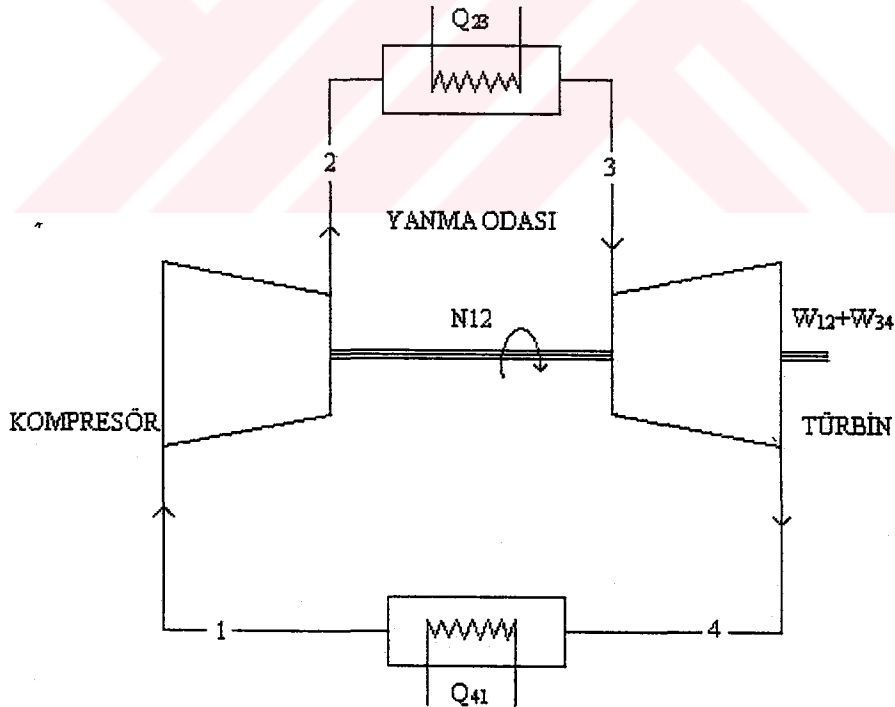
$$\eta_{II} = \frac{E_{\text{son}}}{E_{\text{ilk}}} = \frac{W_{fay}}{W_{\text{terfay}}} = \frac{\text{İstenen son haldeki enerji}}{\text{Sarfedilen ilk haldeki enerji}} \quad (3.24)$$

Sistemlerin ekserji verimlerini eşitlik 3.25'deki gibi tanımlayabiliriz.

$$\eta_{EKS} = \eta_{SIST} = \frac{\text{sistemden elde edilen toplam ekserji}}{\text{sisteme verilen toplam ekserji}} \quad (3.25)$$

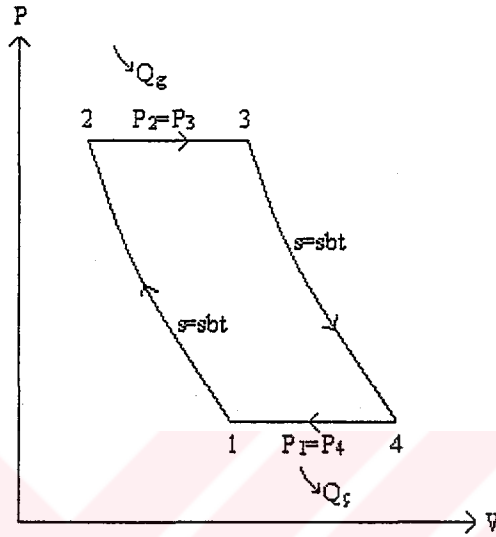
3.3.1. Gaz Türbinlerinin Birinci Kanun Verimi

Tüm gaz türbinleri ve gaz türbinli ısıl güç sistemleri Brayton çevrimi ile ifade edilen ısıl güç dönüşüm sistemine göre çalışırlar. Gaz türbininin ısıl verimi sabit sıcaklıktaki basınç oranı artışlarıyla orantılıdır. En yüksek çıkış gücü ve en yüksek verimi sağlayan basınç oranı; yanma sıcaklığı adı verilen parametrenin bir fonksiyonudur. Basınç oranı kompresör çıkış basıncının kompresör giriş basıncına oranıdır [20].

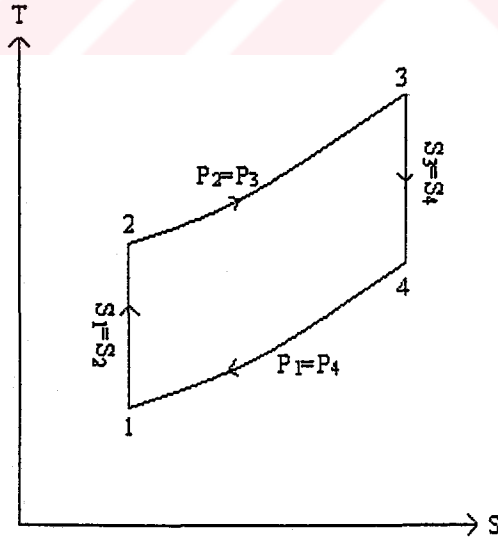


Şekil 3.4. Gaz Türbini Çevriminin Çalışma Şeması

Şekil 3.4'te bir gaz türbininin çalışma şeması görülmektedir. Kompresör tarafından sıkıştırılan hava yanma odasına gönderilir. Yanma odasında yakıt yeterli miktarda havayla yakılarak türbine tahrik verilir. Böylece dönen türbinden bir iş elde edilir [21].



Şekil 3.5. Gaz Türbini Çevriminin P-V Diyagramı



Şekil 3.6. Gaz Türbini Çevriminin T-S Diyagramı

Şekil 3.5 ve şekil 3.6’da gaz türbini çevriminin P-V, T-S diyagramları görülmektedir. Şekil 3.4’e göre kompresör işi eşitlik 3.26’daki gibidir.

$$W_k = W_{12} = -(h_2 - h_1) = -c_p(T_2 - T_1) \quad (3.26)$$

Aynı şekilde türbin işi W_T ;

$$W_T = W_{43} = -(h_4 - h_3) = -c_p(T_4 - T_3) \quad (3.27)$$

olarak bulunur.

Sisteme 2-3 arasında verilen ısı denklem 3.28’den hesaplanabilir.

$$Q_{23} = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2) \quad (3.28)$$

Çevrimin birinci kanun verimini; sisteme verilen emeğe karşılık alınan kazanca göre hesaplayabiliriz. Sistemden elde edilen net işin sisteme verilen ısıya oranı bize birinci kanun verimini verecektir. Sistemden bu işi elde etmek için sisteme verilen ısı 2-3 arasındadır. Dolayısıyla birinci kanun verimi;

$$\eta = \frac{W_{\text{net}}}{Q_{\text{giren}}} = 1 - \frac{Q_{\text{ç}}}{Q_{\text{g}}} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} \quad (3.29)$$

$$\eta = \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (3.30)$$

olarak verilebilir. Sistemde basınç oranını r ile gösterebiliriz.

$$r = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} \quad (3.31)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3.32)$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3.33)$$

3.32 ve 3.33 eşitliklerini 3.30 eşitliğinde yerine koyarsak gaz türbinleri için birinci kanun verimine ulaşabiliriz.

$$\eta = 1 - \left(\frac{1}{r^{(k-1/k)}} \right) \quad (3.34)$$

İş oranını r_w ile gösterirsek, iş oranı 3.35 denkleminde elde edilebilir.

$$r_w = \frac{W_{12} + W_{34}}{W_{34}} = \frac{-(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{-(T_4 - T_3)} = 1 - \frac{T_1}{T_3} r^{\frac{k-1}{k}} \quad (3.35)$$

4. ESENYURT KOJENERASYON TESİSİNİN PERFORMANSININ ANALİZİ

Esenyurt termik santrali, İstanbul ili Bahçeşehir bölgesine kurulmuştur. Santral 22/05/1999 tarihinde işletmeye alınmıştır. Termik santral DOĞA Enerji grubunun bir kuruluşu olarak faaliyet göstermektedir. Santralin ortakları Mission Enerji (ABD) ve Çapan kardeşlerdir. Sistem toplam 180MW'lık bir elektrik üretim kapasitesine sahiptir. Sistemin ilk kurulum aşamasındaki toplam yatırım maliyeti 173 milyon dolardır. Tesiste üretilen elektrik direkt olarak TEDAŞ (Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi)' a satılmaktadır. 180 MW'lık elektrik üretimi bazı çevre şartlarına ve talebe göre azaltılabilmektedir.

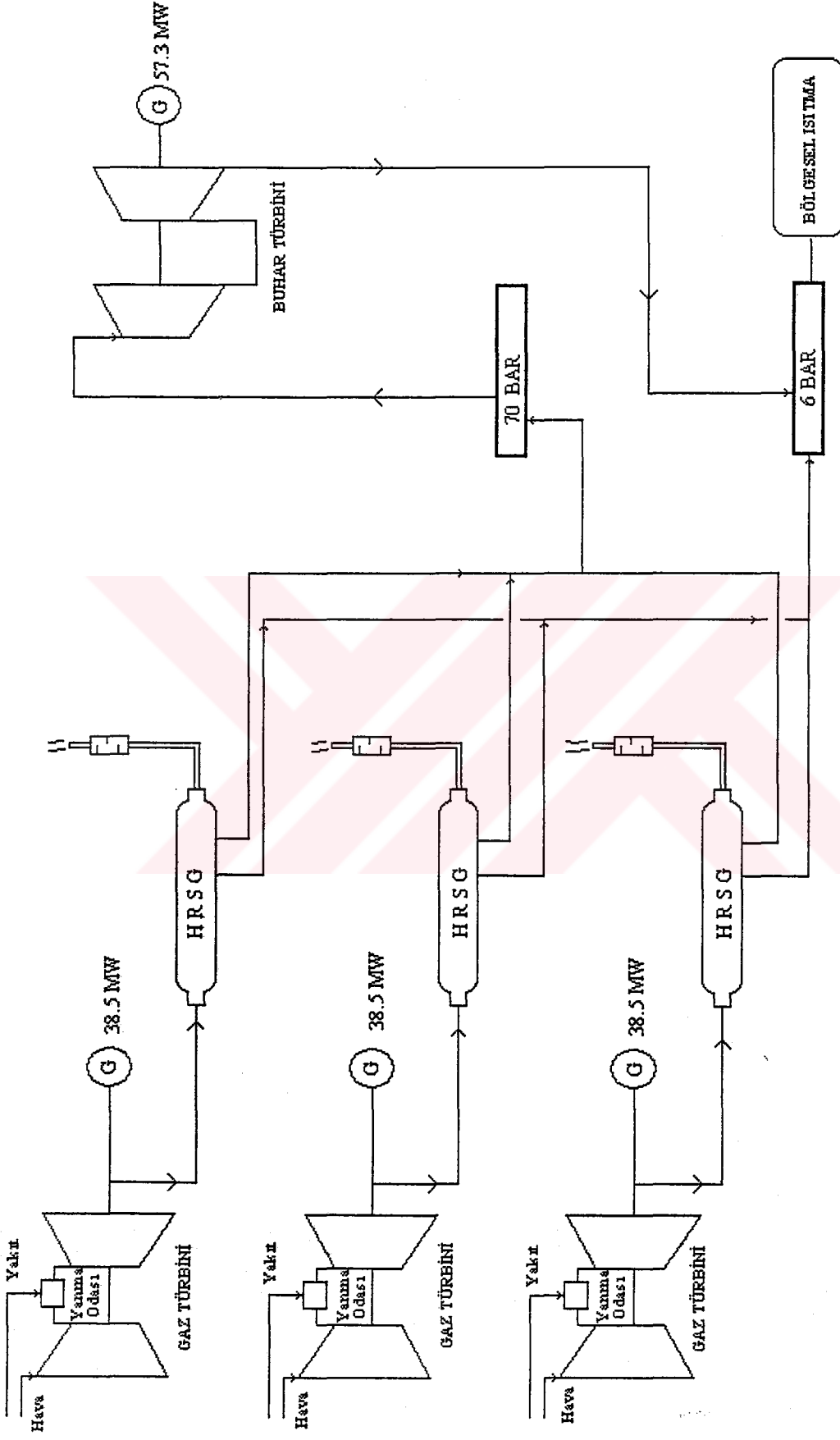
4.1. Santralin Genel Çalışma Prensibi

Santralin genel çalışma prensibi şekil 4.1 ve şekil 4.2 de görülmektedir. Tesiste 40 MW'lık üç gaz türbini ve 57.3 MW'lık bir buhar türbini bulunmaktadır. Sistem hava soğutmalıdır. Gaz türbininde yakıt olarak doğalgaz kullanılmaktadır. Sistemdeki olası gaz kesintileri durumunda gaz türbininde dizel yakıt ta kullanabilmektedir. Dizel yakıt motorin sıvı tanklarında depolanmaktadır.

Gaz türbini, kompresör bölgesinde sıkıştırılan hava türbinin yanma odasına gelen yakıtla birleştirilerek yanma sağlanır. Yanma sonucu oluşan atık gazlar 40 MW'lık gaz türbininin miline tahrik verir. Gaz türbini mili bu tahrikle dönmeye başlar ve kendisine bağlı çalışan 38.5 MW'lık gaz türbini jeneratörünün milini döndürerek elektrik üretimi sağlanmış olur. Buradaki elektrik üretimi tesisin ilk elektrik üretim aşamasıdır. Gaz türbinindeki yanma sonucu oluşan atık gazlar gaz türbininden HRSG (Heat Recovery Steam Generatör) sistemine gönderilir. HRSG yani buhar jeneratörü için atık ısı geri kazanımı sisteminde gaz türbininden gelen atık gazlardan buhar elde etmek için yararlanılmaktadır. HRSG'deki atık gazlar HRSG içindeki ve HRSG'ye bağlantılı sistemlerle (evaporatör, süper ısıtıcı, ekonomizer vs.) suyun buhar olarak elde edilmesini sağlar. Atık gazlar HRSG'den geçerek bir baca yoluyla dış ortama atılırlar. HRSG sisteminde oluşan buhar 70 bar ve 6 bar'lık iki farklı basınçta elde edilir. 70 bar'lık yüksek basınçlı buhar HP (High Pressure) sistemiyle buhar türbinine gönderilir. Buhar türbinine gönderilen yüksek basınçlı buhar, buhar türbinin 57.3 MW'lık milini tahrik eder.

Buhar türbinin milinin dönmesiyle kendisine bağlı 56.4 MW'lık buhar türbini jeneratörünü tahrik eder. Buradaki elektrik üretimi tesisin ikinci elektrik üretim aşamasıdır. Üretilen bu elektrik de TEDAŞ' a verilir. Buhar türbininden çıkan yüksek basınçlı buhar kondenserde yoğunlaştırılarak alçak basınçlı buhar haline getirilir. Bu buhar LP (Low Pressure) sisteminden geçirilerek 6 bara indirilir. Buhar türbininden çıkan düşük basınçlı 6 bar' lık buhar ile HRSG' de oluşan 6 barlık buhar birleştirilerek borular vasıtasıyla termik santralin çevresindeki siteler için bölgesel ısıtmada kullanılmak amacıyla gönderilir. Sonuç olarak, santralde gaz türbinlerinde yakıt yakılarak iki aşamada elektrik üretimi ve iki ayrı basınçta buhar oluşumu sağlanmaktadır.





Şekil 4.2. Esenyurt Termik Santrali (Kojenerasyon Tesisi)'nin Genel Çalışma Şeması

Tablo 4.1.a ve tablo 4.1.b’de santraldeki elemanların bazı teknik özellikleri yer almaktadır. Tabloda yer alan eleman kodlarından şekil 4.1’deki her bir elemanın yeri tespit edilebilir.

Tablo 4.1.a. Sistemdeki Elemanların Özellikleri

<u>ELEMANIN ADI</u>	<u>ELEMANIN KODU</u>	<u>TEKNİK ÖZELLİKLERİ</u>	<u>BOYUTLARI</u>
GAZ TÜRBİNİ x3	1-MB001 2-MB001 3-MB001	Şaft Gücü 40 MW, Yakıtın Yanması 122.7 MW/h	
GAZ TÜRBİNİ JENERATÖRÜ x3	1-MKA01 2-MKA01 3-MKA01	Gücü 38.5 MW, Güç Oranı 45.4 MVA, Güç Faktörü 0.85	
HRSG x3 (HEAT RECOVERY STEAM GENERATÖR)	1-HA001 2-HA002 3-HA003	HP-LP Bölümü Gücü 64.2 MW/h, DH Bölümü Gücü 5.8 MW/h, Toplam Isı Gücü 70 MW/h	
HRSG EŞANJÖRÜ	0-LCA64-AC300	Isı Gücü 56 MW/h	
2 AŞAMALI VAKUM SİSTEMİ	0-MAJ01-AC001	Isı Gücü 300 kW/h, Düşük Basınç Buhar Konsantrasyonu 550 kg/h	
DÜŞÜK SICAKLIK KONDENSERİ	0-N0036-AC401/402	Isı Gücü 12.3 MW/h	
YÜKSEK SICAKLIK KONDENSERİ	0-N0036-AC403	Isı Gücü 12.3 MW/h	
YOĞUŞTURUCU POMPASI	0-LCB01-AP001/002	Başlangıç Basıncı 10 bar, Gücü 90 kW, Anlık Gücü 424 kWe	Kapasite 325 m ³ /h
SİRKÜLASYON POMPASI	0-NOC36-AP401/402/403	Başlangıç Basıncı 8,3 bar, Gücü 360 kW, Anlık Gücü 425 kWe	Kapasite 1260 m ³ /h
SU TEMİN POMPASI	0-GCK75-711/712	Başlangıç Basıncı 4.5 bar, Gücü 9.9 kW, Anlık Gücü 15 kWe	Kapasite 30 m ³ /h
SAF SU POMPASI	0-GAF51-AP731/732	Başlangıç Basıncı 3.8 bar Gücü 9.2 kW, Anlık Gücü 15 kWe	Kapasite 30 m ³ /h
YOĞUŞTURUCU TANKI	0-MAG01-BB001		Hacmi 29 m ³ , Çapı 2400 mm, Uzunluğu 6400 mm
ANİ YOĞUŞTURUCU TANKI	0-MAG01-BB002		Hacmi 16 m ³ , Çapı 1000 mm, Uzunluğu 2000 mm

Tablo 4.1.b. Sistemdeki Elemanların Özellikleri

<u>ELEMANIN ADI</u>	<u>ELEMANIN KODU</u>	<u>TEKNİK ÖZELLİKLERİ</u>	<u>BOYUTLARI</u>
SAF SU DEPOLAMA TANKI	0-GAD51-BB700		Hacmi 1240 m ³ , Çapı 11250 mm, Uzunluğu 12500 mm
SU DEPOLAMA TANKI	0-GCL75-BB710		Hacmi 940 m ³ , Çapı 10000 mm, Uzunluğu 12000 mm
HAVA SOĞUTMALI KONDENSER FANI	0-MGA01—AC001-010-KN001	Başlangıç Basıncı 15 mbar, Gücü 75 kWe, Anlık Gücü 93 kWe	Kapasite 400 Nm ³ /s
HAVA SOĞUTMALI KONDENSER	0-MAG01	Isı Gücü 96 MW/h, İç Hava Sıcaklığı 15 C ⁰	
NÖTRALİZASYON POMPASI	0-GNK70		Hacmi 25 m ³
ÜFLEME TANKI	1-HAN02-BB001		Hacmi 28 m ³ , Çapı 1200 mm, Uzunluğu 2500 mm
HAVALANDIRMA FANI x3	1-MB001-KN001/002 2-MB001-KN001/002 3-MB001-KN001/002	Başlangıç Basıncı 25 mbar, Gücü 30 kWe, Anlık Gücü 37 kWe	Kapasite 400 Nm ³ /s
HAVA TUTUCU x3	1-LA002-BB001 2-LA002-BB001 3-LA002-BB001		Hacmi 30 m ³ , Çapı 2500 mm, Uzunluğu 6530 mm
EKONOMİZER POMPASI x3	2-LAC02/03-AP001	Başlangıç Basıncı 60-90 bar, Gücü 280 kW, Anlık Gücü 450 kWe	Kapasite 400 Nm ³ /s
EKONOMİZER x3	1-LAC02-AC001 2-LAC02-AC001 3-LAC02-AC001	Isı Gücü 2500 kW/h	
BUHAR YOĞUŞTURUCU BÖLGESİ	4-MA001-AC404	Isı Gücü 500 kW/h	
BUHAR YOĞUŞTURUCU FANI	4-MA001-KN403	Başlangıç Basıncı 100 mbar Gücü 4 kWe, Anlık Gücü 5.5 kWe	Kapasite 0,2 Nm ³ /s
BUHAR TÜRBİNİ	4MA01	Şaft Gücü 57.3 MW	
BUHAR TÜRBİNİ JENERATÖRÜ	4MKA01	Gücü 56.4 MW, Güç Oranı 82.4 MWA, Güç Faktörü 0.85	
GENLEŞME KABI	0NOK36-BB401/402		Hacmi 25 m ³ , Çapı 2350 mm, Uzunluğu 6700 mm

4.2. Performans Hesaplamaları

Mümkün olan en uygun enerji analizi; ihtiyaç olunan noktaların belirlenmesi, çözüm için en uygun temel ekserji dengelerinin tespitiyle olur [12]. Enerji analizi için termodinamiğin birinci kanunu kullanılırken, ekserji analizi için termodinamiğin birinci ve ikinci kanunu birlikte kullanılmaktadır. Her iki analiz de hem sistemin madde balansı (dengesi) hem de hesaplamaları için kullanılabilir. Enerji analizinin sınırlı olarak yapılabilmesi ekserji görüşünü ortaya çıkarmıştır.

Tablo 4.2.a'da şekil 4.1'deki sistemin çalışma şemasında yer alan ünitelerin (1,2,3...23) sistem işletmede değilken termodinamik özellikleri verilmektedir. Tablo 4.2.b'de ise sistem işletmede iken ünitelerin termodinamik özellikleri verilmektedir.

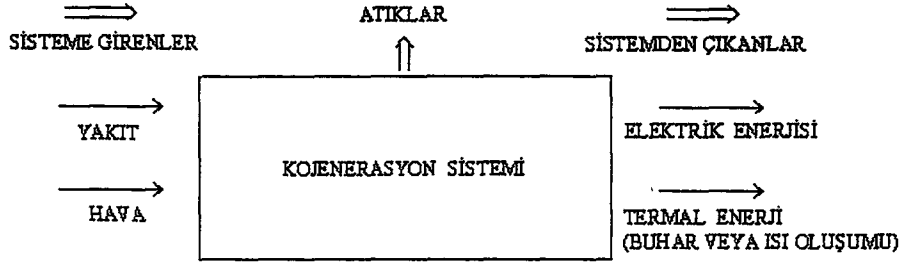
Tablo 4.2.a. Sistem İşletmede Değilken Ünitelerin Bazı Termodinamik Özellikleri (W=0MW/h)

ÜNİTE	ORTAM	DEBİ $m_s(\text{kg/s})$	BASINÇ $P_0(\text{bar})$	SICAKLIK $T_0(\text{C}^0)$	ENTALPİ $h_0(\text{kJ/kg})$
1	HAVA	140.5	1013	15.0	15.0
2	YAKIT	2.5	25.0	15.0	33.0
3	ATIK GAZ	142.8	1038	536.0	583.0
4	BACA GAZI	142.8	1013	116.8	171.6
5	HP BUHAR	18.1	56.3	509.1	3447.5
6	LP BUHAR	3.6	6	203.8	2858.1
7	LP BUHAR	0.4	6	203.8	2858.1
8	HP BUHAR	54.2	55.2	508.6	3447.5
9	LP BUHAR	9.4	6	203.8	2858.1
10	EK BUHAR	0.0	-	-	-
11	EK BUHAR	0.0	-	-	-
12	B.T.Ç.B.	63.6	0.18	57.8	2433.5
13	KONDENSER ÇIKIŞ	0.0	-	-	-
14	KONDENSER ÇIKIŞ	0.0	-	-	-
15	SOĞUTUCU KONDENSER	63.6	0.18	57.8	2415
16	YOĞUŞMUŞ BUHAR GERİ KAZANIMI	63.8	6.5	610	255.5
17	EKONOMİZER ÇIKIŞI (SICAK)	21.3	30	95	398.1
18	EKONOMİZER GİRİŞİ (SICAK)	21.6	12	105.0	440.5
19	EKONOMİZER ÇIKIŞI (SOĞUK)	21.6	12	71.7	300
20	SİRKÜLASYON POMP.GİRİŞİ (SU)	0.0	-	-	-
21	ISI SAĞLAYICIYA GİRİŞ (SU)	0.0	-	-	-
22	KONDENSER ÇIKIŞI (SU)	0.0	-	-	-
23	KONDENSER ÇIKIŞI (SU)	0.0	-	-	-

Tablo 4.2.b. Sistem İşletmedeyken Ünitelerin Bazı Termodinamik Özellikleri

ÜNİTE	ORTAM	DEBİ $m_s(\text{kg/s})$	BASINÇ $P(\text{bar})$	SICAKLIK $T(^{\circ}\text{C})$	ENTALPİ $h(\text{kJ/kg})$
1	HAVA	140.5	1013	15.0	15.0
2	YAKIT	2.5	25.0	15.0	33.0
3	ATIK GAZ	142.8	1038	536.0	583.0
4	BACA GAZI	143.1	1013	80.1	83.2
5	HP BUHAR	24.0	74.4	510.0	3429.4
6	LP BUHAR	3.2	6.1	202.3	2854.0
7	LP BUHAR	0.5	6.1	202.3	2854.0
8	HP BUHAR	72.1	72.9	509.3	3429.4
9	LP BUHAR	8.1	6.1	202.3	2854.0
10	EK BUHAR	0.0	-	-	-
11	EK BUHAR	20.4	1.8	116.1	2635.1
12	B.T.Ç.B.	59.7	0.15	54	2346.2
13	KONDENSER ÇIKIŞ	0.0	-	-	-
14	KONDENSER ÇIKIŞ	2.4	17	115.8	485.8
15	SOĞUTUCU KONDENSER	59.7	0.15	54.0	225.6
16	YOĞUŞMUŞ BUHAR GERİ KAZANIMI	80.4	6.5	714	299.2
17	EKONOMİZER ÇIKIŞI (SICAK)	26.8	30	95	398.1
18	EKONOMİZER GİRİŞİ (SICAK)	27.3	12	105.0	440.5
19	EKONOMİZER ÇIKIŞI (SOĞUK)	27.3	12	82	343.2
20	SİRKÜLASYON POMP.GİRİŞİ (SU)	356.4	3.0	70.0	293.2
21	ISI SAĞLAYICIYA GİRİŞ (SU)	118.2	11.0	80.8	338.5
22	KONDENSER ÇIKIŞI (SU)	356.4	10.5	110.0	4615
23	KONDENSER ÇIKIŞI (SU)	356.4	10.0	110.0	4615

Seçilen sistemin genel ekserji analizini yapabilmek için sistemdeki toplam ekserjileri hesaplamak gerekir. Yani sisteme giren ve sistemden çıkan tüm kullanılabilir enerjileri (elektik, faydalı enerjiler, sisteme verilen yakıtlar vs.) hesaba katmak gerekir. Şekil 4.3'de sistemin genel enerji akış şeması verilmiştir.



Şekil 4.3. Kojenerasyon Sistemlerinin Genel Enerji Akış Şeması [22]

Sistemden elde edilen yararlı enerjiler elektrik enerjisi ve termal enerjilerdir. Termal enerjiler buhar oluşumu veya proses ısı oluşumu sırasında açığa çıkan yararlı enerjilerdir.

4.2.1. Birinci Kanun Verimi

Birinci kanun verimi için öncelikle gaz türbinini tek başına ele alalım. Sistemden elde edilen işin sisteme verilen işe oranı bize birinci kanun verimini verecektir. Sisteme verilen iş burada yakıt işidir. Sistemde saatte 122.7 MW'lık yakıt yakılarak 38.5 MW'lık elektrik üretilmektedir. Dolayısıyla gaz türbini için birinci kanun verimi denklem 4.1'deki gibidir.

$$W_{GT} = 38.5 \text{ MW/h} = 38500 \text{ kW/h, (Sistemde 3 gaz türbini var)}$$

$$X_Y = 122.7 \text{ MW/h} = 122700 \text{ kW/h, (Sistemdeki 3 gaz türbininde yanma gerçekleşiyor)}$$

$$\eta_{GT} = \frac{\text{elde edilen}}{\text{sarfedilen}} = \frac{W_{GT}}{X_Y} = \frac{38500 \times 3 \text{ (kW/h)}}{122700 \times 3 \text{ (kW/h)}} = 0.314 \quad (4.1)$$

$$\eta_{GT} = 0.314$$

olarak elde edilir.

Görüldüğü gibi gaz türbininin birinci kanun verimi tek başına düşüktür. Bunun nedeni sistemdeki gaz türbininden çıkan atık gazların hesaba katılmamasıdır. Gaz türbininden çıkan atık gazlar HRSG ünitesinden geçerek buhar oluşumunu sağlayacak. Bu oluşan buhar, buhar türbinine gönderilerek yeniden elektrik elde edilecektir. Yani sarf edilen enerji sabitken elde edilen enerjiler artmakta ve verim yükselmektedir.

Dolayısıyla bu tip tesislerde, sistemleri tek başına hesap etmek yerine tüm sistemi ele almak daha doğru olur. O halde kojenerasyon tesisinin genel birinci kanun verimini denklem 4.2'deki gibi hesaplayabiliriz.

$$W_{GT} = 38500 \text{ kW/h, (Sistemde 3 gaz türbini var)}$$

$$X_Y = 122700 \text{ kW/h, (Sistemdeki 3 gaz türbininde yanma gerçekleşiyor)}$$

$$W_{BT} = 56.4 \text{ MW/h} = 56400 \text{ kW/h, (Sistemde bir buhar türbini var)}$$

$$\eta_{LKJ} = \frac{\text{elde edilen}}{\text{sarf edilen}} = \frac{W_{GT} + W_{BT}}{X_Y} = \frac{38500 \times 3 + 56400 \text{ (kW/h)}}{122700 \times 3 \text{ (kW/h)}} = 0.466 \quad (4.2)$$

$$\eta_{LKJ} = \%46.6$$

olarak elde edilir.

Dikkat edilirse sistemin genel birinci kanun verimi artmıştır. Fakat yeterince yüksek değildir. Çünkü bunun nedeni buhar oluşumu sırasında açığa çıkan ve verimi yükseltecek olan HRSG ünitesindeki faydalı enerjiler daha hesaba katılmamıştır. Sistemin genel ikinci kanun veriminde bu enerjiler de hesaba katılacaktır.

4.2.2. İkinci Kanun Verimi

Daha önceden yapılan birinci kanun analizinde sistemde üretilen buharın oluşumu sırasında meydana gelen net faydalı enerjileri verim hesabı için kullanmamıştık. Bu bölümde ise verim hesaplamalarında, elde edilen net elektrik üretimlerine ilave olarak proses ısı üretimlerini de hesaba katacağız. Kojenerasyon sistemlerinde proses ısı üretimi genellikle üç ana bölümde oluşur. Bu üniteler kojenerasyon tesisindeki buhar ısı geri kazanımı (HRSG) ünitesindeki ekonomizer, evaporatör ve süper ısıtıcı üniteleridir [4, 22]. Dolayısıyla ikinci kanun verimini bu proses ısıları da ekleyerek denklem 4.3' teki gibi yazabiliriz.

$$\eta_{II, KOJ} = \frac{W_{GT} + W_{BT} + X_{QP, TOP}}{X_Y} \quad (4.3)$$

Burada $X_{QP, TOP}$ ifadesi, Proses ısının toplam ekserjisini göstermektedir. Üçüncü bölümdeki (3.7) eşitliğini kojenerasyon sistemleri için aşağıdaki formda yazabiliriz.

$$X_{QP} = m_s [(h_g - h_c) - T_0(s_g - s_c)] \quad (4.4)$$

Eşitlik (4.4) ile sistemde oluşan proses ısı miktarlarını bulabiliriz. Burada eşitliğin sağ tarafının ilk bölümü bize proses ısı üretim miktarını verir. Proses ısı üretim miktarı (Q_p) eşitlik (4.5)'te görülmektedir.

$$Q_p = m_s (h_g - h_c) \quad (4.5)$$

Eşitlik (4.4) ve (4.5)'teki c alt indisleri 16 numaralı ünitenin (yoğuşmuş buhar geri kazanımı), s ve g alt indisleri ise proses ısı oluşumu sırasındaki ünitelere ait (ekonomizer, evaporatör, süper ısıtıcı) indislerdir. T_0 ise çevre sıcaklığıdır. ($T_0 = 15^\circ\text{C}$)

Tablo 4.2.b'deki 16 numaralı ünitenin termodinamik özellikleri:

$$m_c = m_{16} = 80.4 \text{ kg/s}$$

$$P_c = P_{16} = 6.5 \text{ bar}$$

$$T_c = T_{16} = 714^\circ\text{C}$$

$$h_c = h_{16} = 299.2 \text{ kJ/kg}$$

16 numaralı ünitenin özgül entropisi 6.5 bar basınç değeri için termodinamik tablolardan $s_c = s_{16} = 6.734 \text{ kJ/kgK}$ olarak bulunur. Aynı şekilde proses ısı üretimi olan ünitelerin termodinamik değerlerini yazabiliriz.

Proses Isı Üretimi Olan Üniteler:

1-A- HP Süper Isıtıcı Bölümü

5 NOLU ÜNİTE

Yüksek basınçlı (HP) buhar elde etmek için
süper kızdırıcı ünitesinin termodinamik özellikleri:

$$m_5 = 24 \text{ kg/s}$$

$$P_5 = 74.4 \text{ bar}$$

$$T_5 = 510^\circ\text{C}$$

$$h_5 = 3429.4 \text{ kJ/kg}$$

$$s_5 = 6.81 \text{ kJ/kgK}$$

Bu değerlerle proses ısının ekserjisini (X_{Qp}) ve proses ısı üretim miktarını (Q_p) hesaplayabiliriz.

$$X_{Qp5} = m_s [(h_g - h_c) - T_0(s_g - s_c)]$$

$$= m_5 [(h_5 - h_{16}) - T_0(s_5 - s_{16})]$$

$$= 24 \text{ (kg/s)} [(3429.4 - 299.2 \text{ (kJ/kg)}) - 288 \text{ (K)} (6.81 - 6.734) \text{ (kJ/kgK)}]$$

$\Rightarrow$

$$X_{Qp5} = 74599.48 \text{ kW} = 74.59 \text{ MW.}$$

Aynı şekilde 5 numaralı ünitenin proses ısı üretim miktarı;

$$Q_{p5} = m_s (h_g - h_c)$$

$$= m_5 (h_5 - h_{16})$$

$$= 24 \text{ (kg/s)} (3429.4 - 299.2 \text{ (kJ/kg)})$$

$$= 75126 \text{ kW} = 75.126 \text{ MW olarak elde edilir.}$$

1-B- LP Süper Isıtıcı Bölümü

6 NOLU ÜNİTE

Düşük Basıncılı (LP) buhar elde etmek için

süper kızdırıcı ünitesinin termodinamik özellikleri:

$$m_6 = 3.2 \text{ kg/s}$$

$$P_6 = 6.1 \text{ bar}$$

$$T_6 = 202.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$h_6 = 2854 \text{ kJ/kg}$$

$$s_6 = 6.756 \text{ kJ/kgK}$$

$$X_{QP6} = m_6 [(h_6 - h_{16}) - T_0(s_6 - s_{16})]$$

$$= 3.2(\text{kg/s}) [(2854 - 299.2(\text{kJ/kg})) - 288(\text{K})(6.756 - 6.734)(\text{kJ/kgK})]$$

$\Rightarrow$

$$X_{QP6} = 8155 \text{ kW} = 8.155 \text{ MW}$$

$$Q_{P6} = m_6 (h_6 - h_{16})$$

$$= 3.2 (\text{kg/s})(2854 - 299.2(\text{kJ/kg}))$$

$$= 8175 \text{ kW} = 8.155 \text{ MW}$$

2-Ekonomizer Bölümü

19 NOLU ÜNİTE

19 numaralı ünitenin termodinamik özellikleri:

$$m_{19} = 27.3 \text{ kg/s}$$

$$P_{19} = 12 \text{ bar}$$

$$T_{19} = 82 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$h_{19} = 343.2 \text{ kJ/kg}$$

$$s_{19} = 6.523 \text{ kJ/kgK}$$

$$X_{QP19} = m_{19} [(h_{19}-h_{16})-T_0(s_{19}-s_{16})]$$

$$= 27.3(\text{kg/s}) [(343.2-299.2(\text{kJ/kg}))-288(\text{K})(6.523-6.734)(\text{kJ/kgK})]$$

⇒

$$X_{QP19} = 2800 \text{ Kw} = 2.8 \text{ MW}$$

$$Q_{P19} = m_{19} (h_{19}-h_{16})$$

$$= 27.3 (\text{kg/s})(343.2-299.2(\text{kJ/kg}))$$

$$= 1201 \text{ kW} = 1.2 \text{ MW}$$

3-Evaporatör Bölümü

Evaporatör devresi HRSG ünitesinin kendisidir. Çünkü oluşan atık gazların ısısıyla suyun buharlaştırılması sağlanmaktadır. Dolayısıyla HRSG için atık gazların HRSG' ye giriş ve çıkış değerlerinden (3-4 nolu üniteler) oluşan proses ısıyı bulabiliriz.

$$X_{Q3-4} = m_s [(h_g-h_c)-T_0(s_g-s_c)] \quad (4.6)$$

Burada denklemin sağ tarafının ikinci bölümündeki entropi farkının değeri çok küçük çıkacaktır. Dolayısıyla $(s_g-s_c) \approx 0$ olacağından ihmal edebiliriz.

3 ve 4 numaralı ünitelerin termodinamik özellikleri:

$$m_3 = 142.8 \text{ kg/s}$$

$$P_3 = 1038 \text{ bar}$$

$$T_3 = 536 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_3 = 583 \text{ kJ/kg}$$

$$m_4 = 143.1 \text{ kg/s}$$

$$P_4 = 1013 \text{ bar}$$

$$T_4 = 80.1 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_4 = 83.2 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}
X_{QP3-4} &= Q_{P3-4} = m_{3-4}(h_3 - h_4) \\
&= 142.8 \text{ (kg/s)}(583 - 80.1 \text{ (kJ/kg)}) \\
&= 71814.12 \text{ kW} = 71.81 \text{ MW}
\end{aligned}$$

Şimdi elde ettiğimiz proses ısı üretimi ve proses ısının ekserjisi miktarlarını toplayabiliriz

$$\begin{aligned}
X_{QP, TOP} &= X_{QP5} + X_{QP6} + X_{QP19} + X_{QP3-4} \\
&= 74.59 + 8.155 + 2.8 + 71.81 \\
&= 157.355 \text{ MW}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
O_{P, TOP} &= Q_{P5} + Q_{P6} + Q_{P19} + Q_{P3-4} \\
&= 75.126 + 8.175 + 1.2 + 71.81 \\
&= 156.311 \text{ MW}
\end{aligned}$$

olarak elde edilir. Bulduğumuz bu değerleri denklem (4.3)'te yerine yazarak ikinci kanun verimini bulabiliriz.

$$\begin{aligned}
\eta_{II, KOJ} &= \frac{W_{GT} + W_{BT} + X_{QP, TOP}}{X_Y} \Rightarrow \\
&= \frac{38500 \times 3 \text{ (kW)} + 56400 \text{ (kW)} + 157355 \text{ (kW)}}{122700 \times 3 \text{ (kW)}} = 0.894
\end{aligned}$$

$\eta_{II, KOJ} = \%89.4$ olarak elde edilir.

4.2.3. Güç- Isı Oranı

$$GIO = \frac{\text{Üretilen Net Elektrik Gücü}}{\text{Üretilen Net proses Isı}} = \frac{W_{GT} + W_{BT}}{Q_{P, TOP}} \quad (4.7)$$

$$GIO = \frac{(38500 \times 3 + 56400) \text{ kW}}{156311 \text{ kW}} = 1.1$$

$$GIO = 1.1$$

4.2.4. Proses Isı Oranı

$$PIO = \frac{\text{proses ısıının ekserjisi}}{\text{proses ısıı üretim miktarı}} = \frac{X_{QP, TOP}}{Q_{P, TOP}} \quad (4.8)$$

$$PIO = \frac{157355}{156311} = 1.0066$$

$$PIO = 1.0066$$

4.2.5. Faydalı Yakıt Verimi

Faydalı yakıt verimi denklem 4.9' daki gibi toplam proses ısı üretim miktarlarının hesaba katılmasıyla bulunabilir [22].

$$\eta_Y = \frac{W_{GT} + W_{BT} + Q_{P, TOP}}{X_Y} \quad (4.9)$$

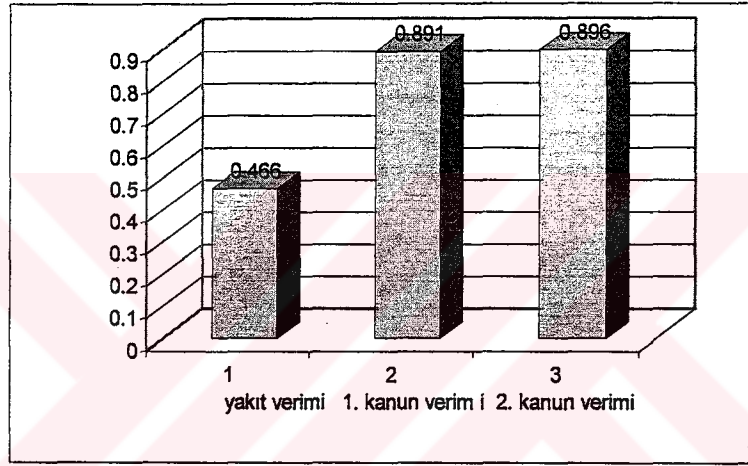
$$= \frac{38500 \times 3 \text{ (kW)} + 56400 \text{ (kW)} + 156311 \text{ (kW)}}{122700 \times 3 \text{ (kW)}} = 0.891$$

$$\eta_Y = \%89.1 \text{ olarak elde edilir}$$

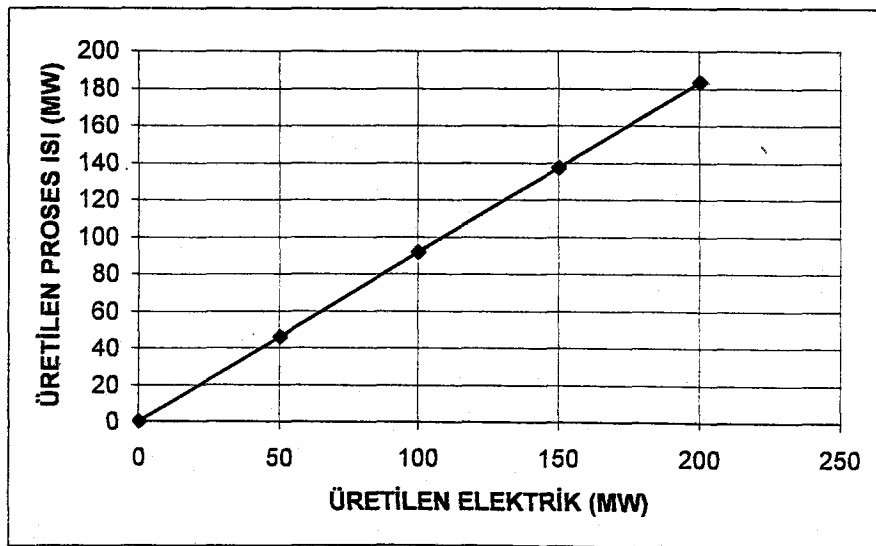
Yakıtın faydalı verimiyle birinci kanun verimi arasında aşağıdaki gibi bir ilişki vardır. Eşitlik (4.2), (4.7) ve (4.9)' un bir arada kullanılmasıyla (4.10) eşitliğine ulaşabiliriz [22].

$$\eta_Y = \eta_{I,KOJ} \left(1 + \frac{1}{G_{IO}} \right) \quad (4.10)$$

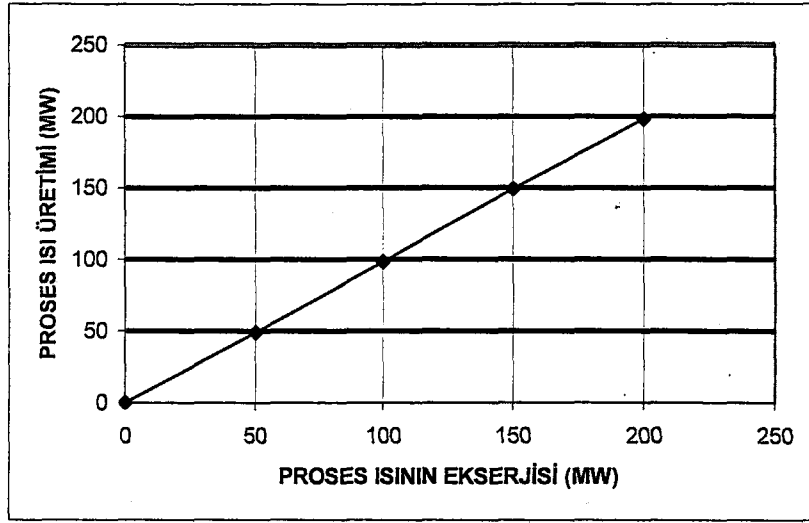
$$\eta_Y = 0.466 \left(1 + \frac{1}{1.092} \right) = 0.892 \text{ olarak elde edilir.}$$



Şekil 4.4. Sistem Verimlerinin Karşılaştırılması



Şekil 4.5. Üretilen Elektrığe Karşı Proses Isı Üretim Miktarı



Şekil 4.6. Proses Isısı Ekserjisi ile Proses Isı Üretimi

Şekil 4.5’de görüldüğü gibi grafikte bir lineerlik söz konusudur. Bunun nedeni üretilen proses ısı miktarlarının birbirlerine çok yakın değerler taşımasıdır.

4.3. Ekonomik Analiz

Aşağıda sistemin ekonomik analizini yapmak için gerekli değerler verilmiştir.

Tesisin Toplam Yatırım Maliyeti: 173.000.000 dolar

Tesiste Toplam Saatlik Elektrik Üretimi: 180 MWh

Tesisin Toplam Saatlik Doğalgaz Kullanımı: $122.7 \times 3 = 368.1$ MWh

Doğalgazın İGDAS’ tan Alım Fiyatı: 0.021456 kWh (YTL)

Üretilen Elektrğin TEDAS’a Satış Fiyatı: 5.97 sent

18/04/2005 Tarihli Dolar Kuru: 1.341 YTL=1.341.000 TL

Bu verilerden yararlanarak sistemin ne kadar zamanda amorti edilebileceğini hesaplayabiliriz. İlk olarak tesiste bir saatte yakılan doğalgazın fiyatını tespit edebiliriz.

Tesiste bir saatte toplam 368100 kW doğalgaz yakılmaktadır. Doğalgazın İGDAŞ'dan alım fiyatı = 0.021456 (kWh)/YTL = 21456 (kWh)/TL'dir.

368100 kWh'lik tüketim için saatlik tüketim fiyatı:

$21456 \times 368100 = 7.897.953.600$ TL olarak elde edilir.

İkinci olarak bir saatte üretilen elektriğin TEDAŞ'a satışından elde edilen kazanç hesaplanabilir. Elektriğin TEDAŞ'a satış fiyatı 5.97 (kWh)/sent = 80.057 (kWh)/TL'dir. Tesiste bir saatte üretilen elektrik 180000 kWh' tir.

18000 kWh' lik üretim için elde edilen saatlik kazanç:

$80.057 \times 180.000 = 14.410.386.000$ TL olarak elde edilir.

Tesisin bir saatte elde ettiği toplam kazanç

= saatlik elektrik üretim kazancı - saatlik yakıt tüketim fiyatı

$= 14.410.386.000 - 7.897.953.600$ TL = 6.512.432.400 TL olarak elde ederiz. Bu fiyat tesisin bir saatteki kazancıdır. Bu kazancı dolar bazında yazarsak;

$\frac{6.512.432.400}{1.341.000} = 4856.4$ dolar . Tesisin bir günlük kazancını hesaplamak için 24 ile çarpılırsa,

$4856.4 \times 24 = 116.554$ dolar olur. Bu fiyat tesisin bir günlük kazancıdır. Tesisin toplam yatırım maliyeti 173 milyon dolardır. Dolayısıyla geri ödeme süresi (GÖS);

$$GÖS = \frac{173 \cdot 000 \cdot 000}{116.554} = 1484 \text{ gün. 1 yıl 365 gün olduğundan;}$$

$$GÖS = \frac{1484}{365} = 4.065 \text{ yıl olarak elde edilir. Tam gününü bulmak için } 365 \times 4 = 1460 \text{ gün (4 yıl)}$$

$$GÖS = 1484 - 1460 = 24 \text{ gün. Sistem 4 yıl 25 gün sonra kendisini amorti edebilmektedir.}$$

4.3.1. Ekonomik Verim

Tesiste saatlik 7.897.953.600 TL'lik tüketime karşılık 14.410.386.000 TL kazanç sağlanmaktadır. Dolayısıyla ekonomik verim (η_{EKV});

$$\eta_{EKV} = \frac{\text{kazanç}}{\text{emek}} = \frac{14.410.386.000}{7.897.953.600} = 1.824$$

$$= \%182.4$$

olarak elde edilir.

Bu değer aynı zamanda santralin bir saatlik kârıdır.

Aşağıda birinci kanun verimi, ikinci kanun verimi, yakıt verimi, güç-ısı oranı ve proses ısı oranlarının daha kolay hesabı için yapılan bir bilgisayar programının akış şeması, sayfa 56' da ise akış şeması verilen bilgisayar programı gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Bilgisayar Programı İçin Akış Şeması

C KOJENERASYON SİSTEMİ HESAPLAMALARI

```
TO=288
KTOP=0
XKTOP=0
N=0
READ(*,*)WGT,'GAZ TÜRİNİ GÜCÜ=KW'
READ(*,*)WBT,'BUHAR TÜRİNİ GÜCÜ=KW'
READ(*,*)XY,'YAKITIN EKSERJİSİ=KW'
20 READ(*,*)MS,'BUHARIN DEBİSİ=KG/S'
READ(*,*)HS,'BUHARIN ENTALPİSİ=KJ/KG'
READ(*,*)SS,'BUHARIN ENTROPİSİ=KJ/KGK'
READ(*,*)HC,'YOĞUŞAN BUHARIN ENTALPİSİ=KJ/KGK'
READ(*,*)SC,'YOĞUŞAN BUHARIN ENTROPİSİ=KJ/KGK'
N=N+1
K=MS*(HS-HC)
XK=K-MS*(SS-SC)
IF(N.EQ.4)GO TO 10
XKTOP=XKTOP+K
KTOP=KTOP+K
GO TO 20
10 WRITE(*,*)XKTOP,'TOPLAM PROSES ISI EKSERJİSİ='
WRITE(*,*)KTOP,'TOPLAM PROSES ISI ÜRETİMİ='
NI=(WGT*3+WBT)/(XY*3)
NII=(WGT*3+WBT+XKTOP)/(XY*3)
NY=(WGT*3+WBT+KTOP)/(XY*3)
GIO=(WGT*3+WBT)/(XKTOP)
PIO=XKTOP/KTOP
WRITE(*,*)NI,'BİRİNCİ KANUN VERİMİ='
WRITE(*,*)NII,'İKİNCİ KANUN VERİMİ='
WRITE(*,*)NY,'YAKIT VERİMİ='
WRITE(*,*)GIO,'GÜÇ-ISI ORANI='
WRITE(*,*)PIO,'PROSES ISI ORANI='
STOP
END
```

5. SONUÇLAR

Kojenerasyon sistemlerinde amaç aracı bir akışkana verilen ısıнын bir bölümünü işe dönüştürmektir. Isıl enerjinin geri kalan kısmı akarsulara, göllere, denizlere ve atmosfere atık ısı olarak verilir. Kojenerasyon sistemleri atık ısıнын bir bölümünü işe dönüştürdüğünden sistemin genel verimi %80-90 arasındadır. Bu çalışmada kojenerasyon tesisi olarak Esenyurt Termik Santrali incelenmiştir. Santralin ekserji ve ekonomik analizi yapılmış, inceleme sonucunda;

- gaz türbini verimi, $\eta_{GT} = \%31.4$
- birinci kanun verimi, $\eta_{I,KOJ} = \%46.6$
- ikinci kanun verimi, $\eta_{II,KOJ} = \%89.4$
- faydalı yakıt verimi, $\eta_Y = \%89.1$
- ekonomik verim, $\eta_{EKV} = \%182.4$
- üretilen toplam proses ısı, $Q_{P, TOP} = 156.311 \text{ MW}$
- üretilen toplam proses ısıнын ekserjisi, $X_{QP, TOP} = 157.355 \text{ MW}$
- güç-ısı oranı, $GIO = 1.1$
- proses ısı oranı, $PIO = 1.0066$
- santralin bir saatlik elektrik üretim kazancı = $14.410.386.000 \text{ kWh/TL}$
- santralin bir saatlik yakıt tüketim fiyatı = $7.897.953.600 \text{ TL kWh/TL}$
- santralin bir saatlik net kazancı = $6.512.432.400 \text{ TL kWh/TL}$
- santralin bir saatlik kârı = $\%182.4$
- santralin toplam geri ödeme süresi, $GÖS = 4 \text{ yıl } 25 \text{ gün}$

olarak tespit edilmiştir. Elde edilen değerler sonucu, tespit edilen ikinci kanun verimi %89.4 çıkmıştır. Genel olarak kojenerasyon tesislerinde ikinci kanun verimi %80-90 civarlarında olduğu göz önüne alınırsa incelenen tesisin oldukça verimli çalıştığı tespit edilmiştir.

İkinci kanun verimini daha fazla arttırmak için proses ısı üretim miktarını arttırmak gerekmektedir. Fakat bu olay bazı ek ekipmanları gerektirebilir. Örneğin proses ısı üretiminin artmasıyla buharın debisi de artacağından 10 ve 8 inç olan yüksek basınç ve düşük basınç taşıyıcı buhar borularının çapı arttırılacaktır. Ayrıca sistemde ısı arttıkça güç artacak ve sistemde istenmeyen bazı mekanik titreşimler, gerilmeler, yüksek ısı farkları vs. meydana gelecektir. Ayrıca artan ısı ve güç oranları daha büyük ekserji kayıplarına neden olabilecektir.

Sistemin ekonomik analizinde geri ödeme süresinin yaklaşık 4 yıl olması bu tip sistemlerin ekonomik açıdan oldukça kazançlı olduklarını göstermektedir. Ülkemizde bu tip sistemlerin hızla yaygınlaştırılması için gerekli çalışmaların yapılması gerekmektedir. Fakat bu tip sistemlerin ilk yatırım maliyetlerinin oldukça yüksek olması (100 milyon dolar-2,5 milyar dolar arası) bu tip sistemlere yerli yatırımcıdan çok yabancı yatırımcıların talip olduğunu göz önünde bulundurmalıyız. Sonuç olarak kojenerasyon sistemleri dünyada artan enerji açığı, azalan petrol rezervleri açısından hızla gelişmekte olan bir piyasa olarak gelecekte sanayinin birçok alanında yer alabilecektir.



KAYNAKLAR

1. Agis, O., 2000, Cogeneration Policy, Programmes and Target in Turkey, www.kojenerasyon.com
2. Uluslararası Kojenerasyon Konferansı, 2000, www.icciconference.com
3. Chen S. L., Tsay M. T., Gow H. J., 2005, Scheduling of Cogeneration Plants Considering Electricity Wheeling Using Enhanced Immune Algorithm, *Electrical Power and Energy Systems*, 27, 31–38
4. Bilgen E., 2000, Exergetic and Engineering Analyses of Gas Turbine Based Cogeneration Systems, *Energy*, 25, 1215–1229
5. Malinowska W., Malinowski L., 2003, Parametric Study of Exergetic Efficiency of a Small-scale Cogeneration Plant Incorporating a Heat Pump, *Applied Thermal Engineering*, 23, 459–472
6. Casella F., Malezzoni C., Piroddi C., Pretolani F., 2001, Minimising Production Costs in Generation and Cogeneration Plants, *Control Engineering Practice*, 9, 283-295
7. Marc A. R., Minh N. L., Dincer İ., 2005, Efficiency Analysis of a Cogeneration and District Energy System, *Applied Thermal Engineering*, 25, 147–159
8. Marquez A. C., Heguedas A. S., Jung B., 2004, Monte Carlo-based Assessment of System Availability. A Case Study for Cogeneration Plants, *Reliability Engineering and System Safety*, 1–17
9. Cardona E., Piacentino A., 2004 Optimal Design of Cogeneration Plants For Seawater Desalination, *Desalination*, www.elsevier.com/locate/desal, 166, 411–426
10. Syred C., Fick W., Griffiths A. J., Syred N., 2004, Cyclone Gasifier and Cyclone Combustor for the Use of Biomass Derived Gas in the Operation of a Small Gas Turbine in Cogeneration Plants, *Fuel*, 83, 2381–2392

11. Bayrak M., Midilli A., Nurveren K., 2003, Energy and Exergy Analyses of Sugar Production Stages, International Journal of Energy Research, 27, 989-1001
12. Özçelik Z., 1996, An Energy and Exergy Analysis in Interger-ENKA, İzmir Natural Gas Combined Cycle Power Plant, www.ege.edu.tr
13. Aras H., 2003, Condition and Development of the Facilities Based on Autoproduction Investment model in Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 7, 553-559
14. Çengel Y., Boles M., 2002, Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Literatür Yayıncılık, 498-500
15. Derbentli T., 1996, Bileşik Isı Güç Üretimi, Enerji Dergisi.
16. İnallı M., Yücel H. L., Işık E., 2002, Kojenerasyon Sistemlerinin Teknik Ve Ekonomik uygulanabilirliği, Mühendis ve Makina Dergisi, 3, 506
17. Topuz G., 2003, Çeşitli Kojenerasyon Uygulamaları ve Ülkemize Sağladığı Yararlar, Türkiye Kojenerasyon Derneği, www.eie.gov.tr.
18. www.epdk.org.tr, 2005, Türkiye’de Üretim Lisansı Verilen Tüzel Kişiler
19. İGDAŞ, 1994-1998 Tanıtım Kitabı, Seçil Ofset, 198s, 26-27
20. Işık E., 2004, Elazığ Hilalkent Toplu Konutlarının Kojenerasyon Sistemiyle Bölgesel Isıtılmasının Isıl ve Ekonomik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 114s.
21. Aksoy S., 1972, Çözümlü Teknik Termodinamik Problemleri, Elif Matbaacılık, Ankara, 282s.

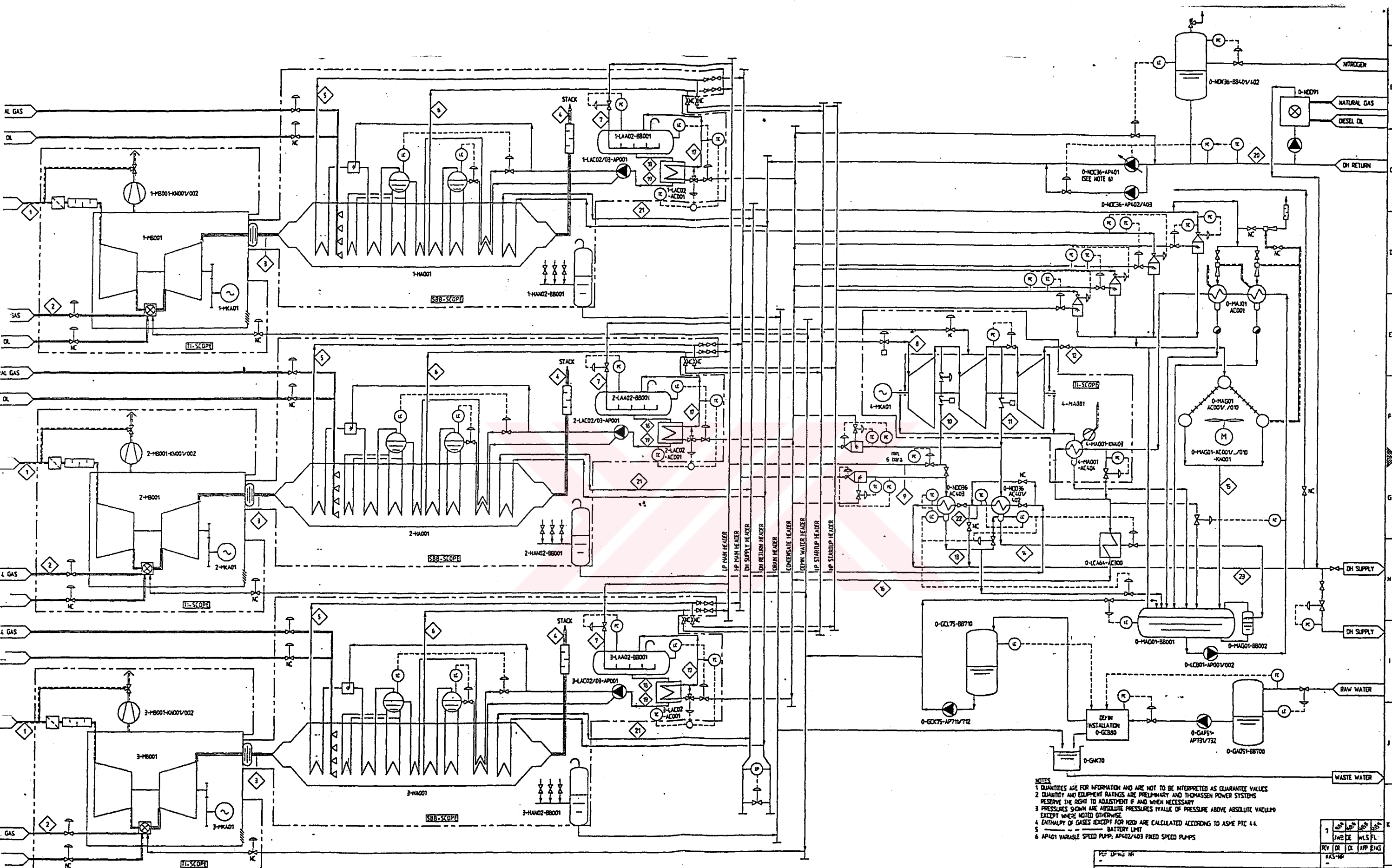
22. Huang F. F., 1990, Performance Evaluation of Selected Combustion Gas Turbine Cogeneration Systems Based on First and Second-Law Analysis, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 112,117



ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Elazığ'da doğdum. İlk, Orta ve Lise tahsilimi Elazığ'da tamamladım. 2003 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldum. 2004 yılında Şişli'de bir doğalgaz firmasında proje mühendisi olarak çalıştım.





- NOTES
1. QUANTITIES ARE FOR INFORMATION AND ARE NOT TO BE INTERPRETED AS GUARANTEE VALUES
 2. QUANTITY AND EQUIPMENT RATINGS ARE PRELIMINARY AND THOMASSEN POWER SYSTEMS RESERVE THE RIGHT TO ADJUSTMENT IF AND WHEN NECESSARY
 3. PRESSURES SHOWN ARE ABSOLUTE PRESSURES (VALUE OF PRESSURE ABOVE ABSOLUTE VACUUM) EXCEPT WHERE NOTED OTHERWISE
 4. ENTHALPY OF GASES EXCEPT FOR H₂O ARE CALCULATED ACCORDING TO ASME PTC 4.4
 5. BATTERY LIMIT
 6. AP401 VARIABLE SPEED PUMP; AP402/403 FIXED SPEED PUMPS

THIRD ANGLE PROJECTION		TITLE PFID COGENERATION POWER PLANT		PROJECT ESENYURT COGENERATION POWER PLANT		PRIOR 4/01		SCALE 1	
Thomassen Power Systems		E601.051.001		1		1		04 260100	