

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

739728

**KOMBİNE GAZ/BUHAR TÜRBİNLİ KOJENERASYON
SİSTEMLERİNİN TERMODİNAMİK ve EKONOMİK
ANALİZİ**

-139728-

Gemi İnş. ve Mak. Müh. Faruk SÜRER

**F.B.E. Gemi İnşaatı Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Tamer YILMAZ

Doç.Dr. Tamer YILMAZ *teyilmaz*
Prof.Dr. İsmail TEKE *teke*
Doç.Dr. O. Azmi ÖZSOYSAL *Özsoysal*

İSTANBUL, 2003

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KÜTÜPHANE**

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. ENERJİ İHTİYACI, KULLANIMI ve KOJENERASYONLU SİSTEMLER ...	6
2.1 Enerji Kaynakları ve Türkiye’ de Elektrik Üretimi	6
2.2 Kojenerasyon Nedir?	13
2.3 Kojenerasyon –Çevre İlişkileri.....	14
2.4 Kojenerasyon Yaklaşımları	17
2.4.1 Merkezi Kullanımlı Tesisler.....	18
2.4.2 Endüstriyel Tesisler	18
2.4.3 Toplam Enerji Sistemleri	19
2.5 Kojenerasyon Teknikleri.....	20
2.5.1 Buhar Türbinli Kojenerasyon.....	20
2.5.1.1 Karşı Basıncılı Buhar Türbinli Kojenerasyon.....	20
2.5.1.2 Ara Buhar Almalı Buhar Türbini Kojenerasyonu	21
2.5.2 Gaz Türbinli Kojenerasyon	22
2.5.2.1 Basit Çevrimli Gaz Türbinli Kojenerasyon.....	22
2.5.2.2 Rejeneratör İlaveli Gaz Türbinli Kojenerasyon Sistemi	23
2.5.3 Kombine Çevrimli Kojenerasyon Sistemleri	24
2.5.4 İçten Yanmalı Motor Kojenerasyonu	28
2.5.4.1 Dizel Motorlu Kojenerasyon.....	28
2.5.4.2 Gaz Motorlu Kojenerasyon	30
2.5.5 Yakıt Hücreleri	32
2.5.5.1 Yakıt Hücrelerinin Çalışma Prensibi ve Kullanılan Ekipmanlar	32
2.5.6 Mikro Türbinler	34
2.5.7 Yakıt Hücresi–Mikro Türbin Karma sistemleri	34
3. TERMODİNAMİK ve EKONOMİK ANALİZ	35
3.1 Termodinamik Analiz	35
3.2 Ekonomik Analiz	40
3.3 Sayısal Örnek.....	43

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA 47

5. KAYNAKLAR..... 55

6. ÖZGEÇMİŞ..... 58



SİMGE LİSTESİ

C	Yıllık maliyetler
c_e	Elektrik enerjisi birim fiyatı
c_p	Sabit basınç özgül ısı
$\dot{E}$	Ekserji
F	Yakıtın birim fiyatı
H_u	Yakıtın alt ısı değeri
h	Özgül entalpi
I	Tesisin ilk yatırım maliyeti
i	Faiz oranı
$\dot{m}$	Kütleli debi
n	Tesisin ömrü
$\dot{Q}$	Isı transferi
P	Basınç
R	Güç/Isı oranı
s	Özgül entropi
T	Sıcaklık
$\dot{W}$	Güç
α	Ekstrem sıcaklıklar oranı
η_b	Yanma verimi
η_E	Ekserji verimi
η_G	Jeneratör verimi
η_{th}	Termik verim
η_y	Yapay termik verim
θ	Adyabatik sıcaklık oranı
ψ	T_E/T_A

İndisler

A-E	gaz türbini çevrimi durum noktaları
1-8	buhar çevrimi durum noktaları
b	buhar
bt	buhar turbini
f	doymuş sıvı
g	doymuş buhar
g	gaz
gt	gaz türbini
i	i hal noktası
p	proses
T	toplam

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif akım
BG	Buhar Geliri
BIG	Bileşik Isı Güç
DC	Doğru Akım
EG	Elektrik Geliri
EYO	Enerji Yararlanma Oranı
GÖS	Geri Ödeme Süresi
TEP	Ton Petrol Eşdeğeri
LPG	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
YÇS	Yıllık Çalışma Süresi



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Kojenerasyon ve konvansiyonel sistemlerle enerji üretimi.....	14
Şekil 2.2	Kojenerasyon formları	17
Şekil 2.3	Merkezi ısı ve güç kojenerasyon sistemi.....	18
Şekil 2.4	Endüstriyel kojenerasyon sistemleri	19
Şekil 2.5	Karşı basınçlı buhar türbini kojenerasyon sistemi	20
Şekil 2.6	Ara buhar almalı buhar türbini kojenerasyon sistemi	21
Şekil 2.7	Basit çevrimli gaz türbini kojenerasyon sistemi	23
Şekil 2.8	Basit çevrimli gaz türbini kojenerasyon sistemi enerji dağılımı	23
Şekil 2.9	Rejeneratör ilaveli gaz türbini kojenerasyon sistemi akış şeması	24
Şekil 2.10	Kombine gaz–buhar türbinli kojenerasyon tesis şeması	25
Şekil 2.11	A işletmesinin aylara göre yük değişim grafiği	26
Şekil 2.12	Isı geri kazanımlı kombine gaz–buhar çevrim santrali	27
Şekil 2.13	Isı geri kazanımlı ve ara buhar almalı kombine çevrim santrali.....	27
Şekil 2.14	Kombine gaz–buhar kojenerasyon sistemi.....	27
Şekil 2.15	Dizel motorlu birleşik ısı güç sistemi	29
Şekil 2.16	Gaz motorunda enerji dağılımı	30
Şekil 2.17	Gaz motorlu kojenerasyon sisteminin prensip şeması	31
Şekil 2.18	Yakıt hücresi şematik resmi	33
Şekil 3.1	Kombine kojenerasyon tesisinin şematik gösterimi	36
Şekil 3.2	Kombine gaz–buhar çevriminin T–s diyagramı	36
Şekil 3.3	Kojenerasyon sistemleri ilk yatırım maliyeti grafiği	41
Şekil 4.1	$\dot{W}_{gt}/(\dot{m}_b \cdot c_{pg} \cdot T_A) - \theta$ değişimi.....	47
Şekil 4.2	$\dot{m}_b/\dot{m}_g - \theta$ değişimi	48
Şekil 4.3	Çekilen buhar miktarı ile Güç/Isı oranının değişimi.....	48
Şekil 4.4	Güç/Isı oranıyla toplam gücün değişimi	49
Şekil 4.5	Güç/Isı oranıyla toplam ekserji, toplam güç ve proses ısısı değişimi	50
Şekil 4.6	Güç/Isı oranıyla verim değerlerinin değişimi	50
Şekil 4.7	Toplam Gelir - $\dot{W}_T$ değişimi	51
Şekil 4.8	Toplam Gider - $\dot{W}_T$ değişimi	51
Şekil 4.9	Güç/Isı oranıyla gelir değerlerinin değişimi	52
Şekil 4.10	Gaz türbini gücü ile geri ödeme süresinin değişimi.....	53
Şekil 4.11	Toplam Güç – Geri Ödeme Süresi değişimi.....	53
Şekil 4.12	Güç/Isı oranıyla geri ödeme süresinin değişimi	54

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Elektrik enerjisi talebi	9
Çizelge 2.2 Türkiye’ deki elektrik enerjisi üretiminin gelişimi	12
Çizelge 3.1 Kojenerasyon sistemlerinde birim kurulu güç için işletme ve bakım maliyetleri.....	42



ÖNSÖZ

Yüksek Lisans eğitimim süresince derslerim ve tez çalışmamla ilgili olarak hep yakın desteğini hissettiğim danışmanım Doç. Dr. Tamer Yılmaz' a ve Gemi İnşaatı Mühendisliği Bölümü'nün değerli akademisyenlerine, Sn. Necmettin Güner başta olmak üzere ilgi ve yardımlarını esirgemeyen bütün mesai arkadaşlarıma, bu günlerimi borçlu olduğum ve parçası olmaktan hep gurur duyduğum sevgili aileme ve biricik eşime sonsuz teşekkürlerimle!..



ÖZET

Günümüzde enerji gereksinimi hızla artmıştır. Buna bağlı olarak da yeni enerji kaynaklarına yönelme veya eldeki kaynakları daha verimli kullanma zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Bu aşamada kojenerasyon sistemleri gündeme gelmektedir. “Birleşik Isı ve Güç Sistemleri” olarak da adlandırılan bu sistemler, ısı ve elektrik enerjisi ihtiyacı bulunan tesislerde hem gerekli elektriği üretmekte hem de atık ısıların proseste kullanılmasıyla enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Kojenerasyon sistemleri 1,5-4 yıl gibi bir sürede kendilerini geri ödeyebilmektedirler. Egzoz gazlarının enerjisinin kojenerasyon sistemleri ile proses için kullanılmasıyla yakıt enerjisinden daha yüksek oranda yararlanılmakta ve böylece birincil enerji kaynaklarının kullanımından tasarruf sağlanmaktadır. Bu tezde elektrik üretimi için birleşik gaz/buhar türbini kullanan ve ısı üretimi için buhar türbininden ara buhar çeken bir kombine kojenerasyon sistemi incelenmiştir. Sistemin termodinamik ve ekonomik analizi yapılarak bazı dizayn parametrelerinin performans değerleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Kojenerasyon, Birleşik Gaz Buhar Çevrimi (Kombine Sistem), Güç/Isı Oranı, Ayrılan Buhar Oranı, Geri Ödeme Süresi.



ABSTRACT

Energy demand has increased rapidly in the recent years. For this reason, we have to use our sources efficiently. Combined Heat and Power Systems not only produce high quality electricity but also conserve energy by using waste heat during the process. Cogeneration systems amortise themselves in 1,5-4 years. When the exhaust energy is used in a process, overall efficiency could reach up and significant amount of fuel savings could be obtained. In this thesis a cogeneration system is examined which is composed of a gas turbine unit for the production of electricity, a heat recovery boiler for the production of process steam or hot water and steam. This system uses natural gas for the power generation.

Keywords : Cogeneration, Combined Gas Vapour Cycle (Combined Cycle), Power to Heat Ratio, Process Steam Ratio, Payback Period.



1. GİRİŞ

Fosil kaynaklı yakıt rezervlerinin sınırlı olması, enerji ihtiyacının her geçen gün artması ve sanayileşme hedefleri gerçekleştirilirken önemli çevre sorunlarının ortaya çıkmış olması gibi nedenlerle bütün dünyada birincil yakıt kaynaklarından mümkün olan en yüksek oranda yararlanmak, yenilenebilir enerji sistemlerinin enerji üretimindeki payını arttırmak ve nükleer enerji tesislerini yaygınlaştırmak eğilimleri önem kazanmıştır. İşletmelerde elektrik ve ısı enerjilerine aynı anda ihtiyaç duyuluyor olması ve özellikle mekanik enerji eldesinden sonra atık gazların yüksek sıcaklıkları nedeniyle önemli miktarda ısı enerjisi içeriyor olmaları aynı tesis içerisinde ısı ve mekanik enerji ihtiyaçlarının birlikte karşılanması alternatifini ortaya çıkarmıştır. Bileşik ısı güç üretimi olarak tanımlanan kojenerasyon 1970'li yıllardan itibaren ekonomik ve ekolojik duyarlılıkların artmasıyla daha da önemli hale gelmiştir.

Ülkelerin enerji stratejilerinin tespiti ve dünyadaki hızlı değişikliklere cevap verebilecek halde dönüştürülebilmesi zorunluluğuna bağlı olarak enerji sistemleri ile ilgili çalışmalar hem bilim çevrelerinde hem de akademik olmayan platformlarda önem kazanmaya başlamışlardır. Literatürde kojenerasyon sistemlerinin termodinamik, ekonomik analizleri ile ilgili birçok çalışma görülebilir:

Yang vd. (1971), tarafından rejeneratif gaz türbini çevriminin termodinamik karakteristikleri incelenmiştir. Basınç oranı ve ısı dönüştürücü verimi değerlerine bağlı olarak ek yanmasız bir sistemin performans hesaplamaları yapılmıştır.

Allen ve Kovacik (1984), "Gaz Türbinli Kojenerasyon Sistemlerinin Prensipleri ve Uygulamaları" başlıklı makale yayımladılar. Bu çalışmada gaz türbinli kojenerasyon sistemlerinin avantajları ve gaz türbini egzozunu kullanan ısı kazanım sisteminin incelemesi yapılmıştır.

Spakasky ve Evans (1990), tarafından rankine çevrimi için optimum termodinamik ve ekonomik koşulların tespitine yönelik analitik uygulama çalışması yapılmıştır.

Wilkinson ve Barnes (1993), tarafından "elektrik ve ısı üretimi için kojenerasyon" başlıklı bir kitap yayımlanmış ve farklı kojenerasyon tekniklerinin birbirleri ile ilişkileri incelenmiştir.

Najjar vd. (1994), tarafından gaz türbini motorlarının modellemesini ve simülasyonunu yapan bir çalışma yapılmıştır. Üreticilerin güncel katalogları kullanılarak istenen bir güç değeri için performans değerleri araştırılmıştır.

Koşar (1995), elektrik üretimi için gaz türbini, proses için gerekli sıcak su veya buhar üretimi içinde ısı çevrim kazanı kullanan bir birleşik ısı güç (BIG) sistemi simülasyonu yapılmıştır. Yazılan bilgisayar programı termodinamik analizden sonra geri ödeme süresi esas alınarak bir ekonomik analiz de yapmaktadır.

Külçe ve Topuz (1996), çalışmalarında kojenerasyon ve konvansiyonel sistemlerle enerji üretimlerini incelemiş, ülkemizdeki kojenerasyon tesislerine ait verileri de kullanarak sistem seçiminin nasıl olması gerektiğini incelemişlerdir.

Abut vd. (1997), tarafından ülkemiz için kısa ve uzun vadeli enerji politikalarının belirlenmesinin gerekliliğine işaret edilmiştir. Bu çalışmaya ve 1997 enerji istatistiklerine dayanarak Mendilcioğlu (1998), tarafından önümüzdeki 20 yıl için ne kadarlık elektrik enerjisi yatırımına ihtiyaç duyacağımız ve bu yatırımların tamamının ülkemiz kamu kaynakları tarafından karşılanmasının mümkün olamayacağı ortaya konmuştur.

Şahin vd. (1997), ile Şahin ve Kodal (1999), sonlu zaman termodinamiği teorisi çerçevesinde kojenerasyon tesislerinin maksimum ekserji kriterine göre performans analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Koçak ve Gülşen (1998), tarafından kojenerasyonun tanımı, kojenerasyon teknikleri ve sistem seçimi konuları incelenmiştir. Derbentli, T. (1998), tarafından bölgesel ısıtma konusunda kojenerasyonun ekonomik olurluğunun incelenmesi yapılmıştır.

Feng vd. (1998), tarafından kojenerasyon sistemlerinin incelenmesinde kullanılan kriterler değerlendirilmiş ve “kojenerasyon verimi” adlı yeni bir termodinamik performans kriteri ortaya sürmüşlerdir. Yeni kritere göre kojenerasyon tesisleri için yalnızca enerji yararlanma oranı dikkate alınmamalı, aynı zamanda ısı ve elektriğin maliyetleri paylaşım oranları da belirlenmelidir.

Tuma vd. (1998), tarafından kombine gaz-buhar çevriminin toplam enerji ve ekserji verimi değerleri termodinamik açıdan incelenmiş, gaz türbini egzozu kullanılarak gerçekleştirilecek ek yanmanın ve ısı kazanımlı buhar jeneratörünün veriminin değişmesi hallerine ait hesaplamaları yapmış ve sonuçları grafikler ile göstermişlerdir.

Benelmir ve Feidt (1998), tarafından kojenerasyon sistemleri ve enerji yönetimi stratejileri üzerinde durulmuş, klasik konvansiyonel enerji sistemleri ile kojenerasyon sistemlerinin ilk yatırım maliyetleri, ekonomik avantajları ve geri ödeme süreleri açısından karşılaştırmaları yapılmıştır.

Başol (1999), tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında; birleşik ısı güç (BIG) sistemlerinin enerji talebi açığı ile ilgili olarak Türkiye ve dünya konjoktüründe incelemesi yapılmış ve kojenerasyon tesisi blok olarak incelenmiştir. Ayrıca bir maya üretim tesisinde uygulanan ve 4 MW kapasiteye sahip bir kojenerasyon sistemi ele alınarak geri ödeme süresinin tespitine yönelik ekonomik fizibilite verilmiştir.

Sucuoğlu (1999), bulunulan iklim bölgesine göre farklı çalışma koşullarına sahip değişik tipteki dizel motorlu, gaz motorlu, gaz türbinli ve karşı basınçlı bileşik ısı güç santrallerinin termodinamik ve ekonomik çözümlmeleri bir Visual Basic bilgisayar programı ile yapılmaya çalışılmıştır.

Flávio vd. (1999), termal ve elektriksel yük değerleri bilinen bir fabrika için gaz türbinli kojenerasyon sisteminin termoekonomik açıdan incelenmesini yapmışlardır.

Bilgen (2000), tarafından gaz türbinli kojenerasyon üniteleri için ekserjetik ve termoekonomik analizler yapılmıştır. Gaz türbinli ve kombine kojenerasyon sistemleri ısı/güç oranı değerine bağlı olarak incelenmiş, 1. ve 2. kanun verim değerleri ve bir değere getirilmiş maliyetler esas alınarak geri ödeme süreleri tespit edilmiştir.

Emanet (2000), motor soğutma suları, buhar türbininden ısıtma veya proste kullanım amacıyla alınan buhar ve baca gazları gibi kaynaklardan ortaya çıkan atık ısıların absorpsiyonlu soğutma sistemlerinde kullanılmasıyla tesisin soğutma ihtiyacının karşılanması konusu incelenmiş ve "Dizayn Teknik Boru A.Ş. İzolasyonlu Boru Tesisi" için bir fizibilite çalışması yapılmıştır.

Costa ve Balestieri (2000), tarafından Brezilyadaki kimyasal üretim yapan bir tesis için yakıt olarak doğalgaz kullanan kojenerasyon sistemleri incelenmiştir. Isı kazanımlı buhar jeneratörü içeren, sıkıştırma ve absorpsiyon prosesleri için reküprasyon motorlu, gaz türbinli ve kombine buhar türbinli gaz türbinli olmak üzere üç alternatif sistem geri ödeme süreleri göz önüne alınarak kıyaslanmıştır.

Üst (2001), ekolojik optimizasyon tekniğini kojenerasyon çevrimine uygulamış ve tanımlanan yeni bir ekolojik amaç fonksiyonuna dayalı olarak iç tersinir ve tersinmez kojenerasyon çevrim modelleri için sonlu zaman termodinamiği teorisi çerçevesinde performans analizlerini yapmıştır.

Durmayaz (2001), elektrik enerjisi üretim amaçlı ısıl güç tesislerinde ekserji analizinin önemine değinmiş ve Rankine çevrimine sahip bir ısıl güç tesisi için enerji-ekserji analizi uygulaması gerçekleştirmiştir.

Hepbaşlı ve Özalp (2001), ülkemizdeki kojenerasyon çalışmalarını ve 1994 yılından sonraki gelişmeleri incelemiş, İzmir’de yerleşik bir seramik fabrikası için 13 MWe kapasiteli gaz türbinli bir kojenerasyon tesisine yönelik bir uygulama gerçekleştirmişlerdir.

Kaya ve Ekmekçi (2002), bir birleşik ısı-güç santralinin termodinamik ve ekonomik açıdan incelemesini yapmış, dizel motorlu 1070 kWe elektrik üretimi ve 1360 kW ısıl güç elde edilen bir tesiste yıllık 200.000 \$ tasarruf edilebileceğini ortaya koymuşlardır.

Lucas (2000), tarafından kojenerasyon ve ısı pompaları teknolojilerinin incelendiği bir çalışma ile birincil enerji kaynaklarının verimliliği açısından sistemden elde edilen toplam enerji miktarının değişimi termodinamik olarak incelenmiştir. Yine Lucas (2002), tarafından buhar türbinli bir kojenerasyon tesisi termodinamik açıdan incelenmiş, kullanılabilir proses ısı değerinin ekserji kayıpları ve türbin verimi ifadeleriyle nasıl değiştiği araştırılmıştır.

Silveira vd. (2002), 9 MW elektriksel yük değerine sahip bir üniversite kampüsü için 1,764 kg/s debi ve 0,861 MPa basınç değerlerinde doymuş buhar ile ısı ihtiyacının karşılanmasına yönelik gaz türbinli kojenerasyon sistemini incelemişlerdir. Ekonomik inceleme ile geri

ödeme süresi en iyi olan sistemin tespiti yapılmış, sistemlerin on yıllık kazanç değerleri yönünden karşılaştırmaları yapılmıştır.

Bu tez ile gaz türbini ve buhar türbini kullanan kombine kojenerasyon tesislerinin termodinamik ve ekonomik incelemeleri yapılmıştır. Bir gaz türbininde üretilen yüksek sıcaklıktaki egzoz gazlarının bir atık ısı kazanında değerlendirilmesi sonucunda elde edilen buharın ara buhar almalı bir buhar türbininde kullanılması halinde sistemin enerji yararlanma oranı, ekserji verimi ve yapay termik verim değerlerinin değişimleri ortaya konmuştur. Ayrıca; termodinamik inceleme sonuçlarından yararlanılarak bir ekonomik inceleme de yapılmış ve kombine gaz/buhar türbinli kojenerasyon tesislerinin geri ödeme süreleri tespit edilmiştir.

Enerji kaynaklarımızın ve ülkemizde elektrik enerjisi üretiminin başlangıç olarak incelendiği ikinci bölümde; kojenerasyonun tanımı, kojenerasyon çevre ilişkileri ve kojenerasyon teknolojileri anlatılmıştır. Bölüm 3’de ise proses ısı yükünün ara buhar almalı bir buhar türbini yardımıyla sağlandığı kombine gaz buhar çevrimi sistemi incelenmiş, termodinamik ve ekonomik çözümler için kullanılacak matematik formüller verilmiştir. Ayrıca sistemin değişken ısı yükü taleplerine nasıl cevap vereceği de bu bölümde açıklanmıştır. Son bölümde ise termodinamik ve ekonomik çözümleme için elde edilen formüllerin bilgisayar ortamında değerlendirilmesi ile gaz ve buhar türbinlerinin birlikte kullanılacağı kombine kojenerasyon sistemlerinin seçimine yönelik olarak kullanılacak grafikler ve bunlarla ilgili yorumlar verilmiştir.

2. ENERJİ İHTİYACI, KULLANIMI ve KOJENERASYONLU SİSTEMLER

2.1. Enerji Kaynakları ve Türkiye’de Elektrik Üretimi

Isı enerjisi, insanlığın ilk ve önemli keşiflerinden biri olan ateşle birlikte insanoğlunun en önemli ilgi alanlarından birini oluşturmuştur. Hidrokarbona dayalı mevcut enerji kaynaklarını 50 yıl gibi kısa bir süre içerisinde tükeneyeceği gerçeği, enerjiyi daha verimli kullanmamızı zorunlu kılmaktadır. 1973 ve 1974 yıllarında meydana gelen petrol fiyatlarındaki ani artış, enerji kaynaklarının tüketiminde daha hassas olunması gerektiğini ortaya çıkarmıştır.

Küreselleşen dünyamızda enerji üretimi ihtiyacının artması, yakıt rezervlerinin azalması ve buna bağlı olarak çevre kirlenmesi insanoğlu için en büyük tehditlerden birini oluşturmaktadır. Çok yakın geçmişte ozon tabakasının delinmesi sonucu yağın asit yağmurları, Almanya’da hektarlarca ormanı tahrip etmiştir. Ozon tabakasının sürekli olarak incelme meylinde olması insanlığın geleceğini tehdit etmektedir. Fosil yakıt kullanan enerji üretim santralleri en fazla emisyon üreten tesislerdir.

Geçen yüzyıldan bu yana dünyamızda enerji üretimi 100 kat, çevre kirliliği ise 50 kat artmıştır. Bu artışların ortalama %55’i son yirmi yıl içerisinde olmuştur. Yine geçen yüzyıldan bu yana fosil yakıt kullanımı ve hava kirliliği 30 kat artmıştır. Bitki ve hayvan türlerinin %20’si yok olmuş, orman yüzölçümü %25 azalmış, 480 milyon hektar toprak erozyona uğramıştır. OECD ülkelerinde yılda 20 milyon ton oksijen tüketici madde deniz, göl ve nehirlerle endüstriyel atık olarak atılmaktadır. Bu olumsuzluklar enerjinin gerek üretim gerekse kullanma aşamalarında rasyonel değerlendirilmemesinden kaynaklanmaktadır.

Sanayi ülkelerinde enerji açığını kapatmak ve bu çevresel sorunların yok edilmesi, en azından insan sağlığını tehdit etmeyecek düzeye indirilmesi amacıyla çok çeşitli enerji politikaları uygulanmaktadır. Bu politikalar arasında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması önemli yer tutmaktadır. Bunlar, rüzgar, jeotermal kaynaklar, dalga enerjisi ve benzeridir. Fakat bu santrallerin her zaman ve her yerde kullanılması mümkün olmamaktadır. İkinci bir seçenek ise nükleer enerji santralleri olmaktadır. Fakat hem yatırım maliyetlerinin yüksek olması ve aynı zamanda hatasız çalışmayı gerektirmeleri bu tesislerin negatif yönünü oluşturmaktadır. Meydana gelecek bir radyoaktif madde sızıntısı yüzlerce yıllık bir negatif etkiye sahip olabilecektir. Enerji üretim aşamasında ısı enerjisinin diğer enerji türlerine verimli bir şekilde dönüştürülebilme imkanları, atık enerjilerin değerlendirilmesi, üretilen enerjinin optimum dağıtımı ve kullanımı, fosil yakıt tükenme

hızını ve olumsuz çevresel etkileri azaltacaktır. Isı ve mekanik enerjinin birlikte üretildiği kojenerasyon tesisleri, enerji ve ekserji üretim verimliliği, enerji üretim maliyeti ve ekoloji yönünden ısı ve mekanik enerjinin ayrı ayrı üretildiği klasik tesisleri göre daha yüksek performansa sahip olduğu bilinmektedir. Günümüzde bu tesislerin performansını daha da artırabilmek için muhtelif kriterlere dayalı olarak performans optimizasyonları üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Dünya nüfusunun artması çeşitli sorunlarla birlikte enerji ihtiyacının karşılanması problemini de gündeme getirmiştir. Günümüzde, sanayileşme ve kalkınmanın en önemli girdileri arasında yer alan enerji, bütün dünya ülkelerinde olduğu gibi ülkemizde de önemini ve güncelliğini sürdürmektedir. Teknolojik gelişmeler sonucu enerji gereksinimi hızla artmış ve buna bağlı olarak da petrol bazlı yakıtlar doğal gaz, kömür rezervleri gibi birincil enerji kaynakları da hızla azalmıştır. Ülkemiz enerji kaynakları açısından zengin bir ülke değildir ve bu kaynaklar yıllık birincil enerji ihtiyacının karşılanmasında yetersiz kalmaktadır.

Yukarıda bahsedildiği gibi enerji ihtiyacının artması, kaynakların yetersizliği, enerji maliyetinin yüksek oluşu ve elektrik kalitesinin düşük olması sonucunda, kojenerasyon tekniği uygulamaları gündeme gelmiştir. Özellikle tekstil, kağıt, kimya, gıda gibi hem kaliteli elektrik hem de ısı gereksinimi olan sektörler için kojenerasyon sistemlerinin hem ekonomik hem de teknolojik açıdan kaçınılmaz olacağını düşünmek hata olmaz.

Kojenerasyon sistemleri ülkemizde de yaygınlaşmaktadır. Bu sistemlerin çoğu, tesislerin elektrik ihtiyacı baz alınarak kurulmaktadır. Özellikle ısı ihtiyacı olmayan tesislerde çok miktarda atık ısı meydana geldiğinden oldukça düşük çevrim verimlerinde çalışılmaktadır. Ancak, ülkemizde yeni yaygınlaşmakta olan bir uygulama ile proses ısısına ihtiyaç duyulmayan tesislerde oluşan atık ısı ile absorpsiyonlu soğutma sistemleri kullanarak soğutma yükünün karşılanabilmekte ve kayda değer bir enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

Kojenerasyon tesislerinin toplam enerji çevrim verimlerinin şebeke santrallerinin verimlerine göre daha yüksek olmasından dolayı yılda 2 milyon ton petrol eşdeğeri (TEP) enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Bu değer ise ülkemizde çıkartmaya çalıştığımız doğal gaz miktarının on bir katıdır. Dünyada II.Dünya Savaşı yıllarından beri kullanılmakta olan kojenerasyon teknolojisini, Türkiye'de çeşitli devlet kuruluşları, fabrikalarının atık ya da yan ürünlerini değerlendirmek suretiyle 30 yıldan beri kullanmaya başlamıştır. Bu suretle,

bugüne kadar çeşitli kapasitelerde kojenerasyon tesisleri kurulmuş ve işletilmiştir. Kojenerasyon, son zamanlarda endüstriyel bir tesisin elektrik ve buhar ihtiyacını karşılayan favori bir sistem halini almıştır.

Günümüzde, sanayileşme ve kalkınmanın en önemli girdileri arasında yer alan enerji, bütün dünya ülkelerinde olduğu gibi ülkemizde de önemini ve güncelliğini sürdürmektedir. Enerji kullanımı, endüstrileşme ve ekonomik gelişme ile yakından ilgili olup, enerji tüketimi, refah seviyesinin yükselmesiyle hızla artmaktadır. Ülkemizde de hızla artan enerji talebinin karşılanması zor olup, enerji kaynağının seçiminde dikkatli olunması gerekmektedir.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yapılan çalışmalara göre 1997 yılında 71 milyon ton petrol eşdeğeri (TEP) olan birincil enerji tüketimimizin 2000 yılında 91 milyon TEP, 2010 yılında 167 milyon TEP, 2020 yılında 307 Milyon TEP değerine ulaşması beklenmektedir. Çizelge 2.1' de, yıllara göre sektörel elektrik enerjisi talep tahminleri görülmektedir (Mendilcioğlu,1998).

Yerli enerji üretimi, toplam birincil enerji talebinin 1997'de %41'ini karşılamış olup, 2000'de %34'ünü, 2010 yılında ise %30'unu ve 2020 yılında ise %26'sını karşılayacaktır.

Görüldüğü üzere, ülkemiz enerji bakımından dışa bağımlı ülkeler arasındadır. Bu nedenle, uygulamakta olduğumuz enerji politikalarımızın ana prensibi güvenilir, ucuz, kaliteli enerjiyi zamanında tüketicilere temin etmek ve enerji üretiminde yerli kaynakları öncelikli kullanmaktır. Ülkemiz enerji kaynakları açısından zengin bir ülke değildir. Petrol ve doğal gaz rezervlerimiz son derece kısıtlıdır. 8 milyar ton civarındaki kömür rezervlerimizin büyük bir kısmının kalitesi düşüktür. Linyit ve taşkömürü olarak elektrik enerjisi üretimine müsait olan potansiyel yılda 120 milyar kWh' dir. Teknik ve ekonomik olarak kullanılabilir hidrolik potansiyelimiz ise 125 milyar kWh/yıl dır. Bu nedenle, ihtiyacımız olan enerji kaynaklarının önemli bir kısmını ithal etmek zorundayız.

1997 yılında 103 milyar kWh/yıl olan elektrik enerjisi arzımız 2000 yılında 134 milyar kWh/yıl, 2010 yılında 290 milyar kWh/yıl ve 2020 yılında ise 547 milyar kWh/yıl'a ulaşacağı tahmin edilmektedir. Söz konusu talebi karşılamak için 2010 yılı sonuna kadar yaklaşık 43000 MW'lık kapasitenin sisteme ilave edilmesi gerekmektedir. 2020 yılına gelindiğinde, mevcut kapasiteye 44000 MW'lık bir ilave daha yapılması gerekmektedir. Bu da 2010 yılına kadar

Çizelge 2.1 Elektrik enerjisi talebi (GWh) (Enerji İstatistikleri, 1997)

YILLAR	BRÜT TALEP	NET TALEP	SANAYİ	KONUT	ULAŞTIRMA	TARIM	KİŞİ BAŞINA TÜKETİM (kWh/kışı) (Brüt)
1997	105250	84365	47481	34513	663	1708	1639
1998	113750	933571	53089	37863	796	1823	1743
1999	123650	103782	59343	41538	955	1946	1866
2000	136307	115107	66315	45570	1145	2077	1995
2001	146195	125111	72250	49430	1267	2164	2139
2002	158023	135986	78711	53617	1403	2254	2278
2003	170807	147805	85744	58159	1553	2349	2426
2004	184624	160651	93399	63806	1719	2447	2583
2005	199560	174614	101732	68430	1903	2549	2751
2006	215159	188748	110620	73222	2079	2827	2922
2007	231794	204025	120269	78349	2271	3136	3102
2008	249716	220540	130745	83836	2481	3478	3292
2009	269021	238391	142116	89706	2710	3858	3494
2010	289820	257687	154459	95988	2961	4279	3709
2011	308807	274940	166438	100836	3195	4471	3897
2012	329062	293349	179300	105930	3447	4672	4096
2013	350653	312990	193108	111280	3719	4882	4304
2014	373659	333946	207931	116901	4013	5102	4523
2015	398168	356306	223839	122806	4330	5331	4753
2016	424286	380162	240911	129009	4672	5570	4995
2017	452123	405616	259229	135525	5041	5821	5249
2018	481780	432773	278882	142370	5439	6082	5516
2019	513386	461750	299964	149562	5869	6355	5797
2020	547060	492666	322577	157116	6332	6641	6092

mevcut sisteme yılda ortalama 3500 MW kurulu güç ilavesi, başka bir ifadeyle, her yıl ortalama 3.5 milyar dolarlık bir yatırım ihtiyacını zorunlu kılmaktadır. İletim ve dağıtım sistemine yapılacak ilave yatırımlar ile bu miktar yılda 4.5 milyar dolara yükselmektedir. Söz konusu yatırımın tümüyle ülkemizin kamu kaynakları tarafından karşılanması mümkün değildir (Mendilcioğlu,1998). Bu nedenle, özel sektörün elektrik enerjisi üretmesinin sağlanması, bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

Enerji rezervlerinin sınırlı olduğu ülkemizde, yeni yatırımlar yapılmadığı takdirde, yakın bir gelecekte enerji sorunları ve elektrik kısıtlamaları olacağı da göz önüne alınarak kısa ve uzun vadeli enerji politikaları belirlenmesi gerekir (Abut vd.,1997).

Elektrik sektöründe uygulanacak bu politikalarla, ülkemiz elektrik ihtiyacının zamanında, güvenilir, kaliteli, bol ve ucuz olarak karşılanması amaçlanmaktadır. Bu amaçlar doğrultusunda uygulanması gereken politikaları şöyle özetleyebiliriz:

- Elektrik üretim ve dağıtım tesislerinde yenileme ve idame yatırımlarının planlandığı şekilde ve zamanında yapılması, mevcut üretim tesislerinin daha iyi işletilmesi sağlanarak, emre amade kapasitesinin kurulu kapasiteye doğru artırılması.
- Elektrik üretiminde su ve linyit gibi yerli kaynaklara öncelik verilmesinin yanı sıra, kaynak çeşitliliği, güvenilirlik, minimum maliyet ve elektrik ihtiyacının karşılanması çerçevesinde çalışmalar yapılması.
- Elektrik üretim ve tüketim incelemeleri, yakın zamanda alternatif enerji kaynaklarının kullanılması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Bu çerçevede, nükleer teknoloji ile enerji üretilmesi yoluna gidilmesi.
- Kömüre dayalı termik santrallerin çevreye verebilecekleri zararı önlemek amacıyla, analiz sonuçlarına göre zorunlu görülen tüm mevcut ve tasarım aşamasındaki projelerin baca gazı, kükürt dioksit giderme ünitelerinin ilave edilmesi.
- Bölge ülkeleriyle gerekli elektrik bağlantılarının tesisi ile kapasite fazlası elektriğin satılması.
- Elektrik sektöründeki işletme, bakım ve servis hizmetleriyle arz edilen elektriğin kapasitesinin korunması ve iyileştirilmesi doğrultusunda mevcut düzenlemelerinin revize edilmesi, yeni denetleme ve düzenleme mekanizmalarının kurulması.

- Elektrik sektöründe hizmetlerin daha kaliteli yürütülmesi, verimliliğin artırılması için özelleştirme çalışmalarına hız verilmesi, kapsamlı bir özelleştirme programıyla yerli ve yabancı sermayenin elektrik sektörüne katılımının artırılması.

Hedeflenen kalkınma hamlelerinin gerçekleştirebilmesi için Devlet - Özel Sektör ve Yabancı Sermaye işbirliğini güçlendirmeye yönelik önemli çabalar sarf edilmektedir. Bu çerçevede gerekli hukuki düzenlemeler yapılarak özel sektör ve yabancı sermayenin sektöre Yap-İşlet-Devret, Yap-İşlet, İşletme Hakkı Devri ve Otoprodüktör modelleri ile yatırım yapmalarına imkan sağlanmıştır.

Otoprodüktörlük uygulamasının amacı, özellikle sanayi sektöründe enerji verimliliğini arttırmak, sanayi ürünleri içindeki enerji maliyet payını aşağı çekerek birim maliyetleri azaltmak ve böylece sektörün dış pazarlardaki rekabet gücünü arttırmak, sektöre güvenilir ve ucuz enerji temin etmek, birincil enerji kaynaklarından tasarruf etmek ve enerji yatırımlarına katkıda bulunulmasını sağlamaktır. Otoprodüktör statüsünde gerçekleştirilen yatırımlara Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından destek verilmektedir (Mendilcioğlu,1998).

Bugün Türkiye' de kişi başına elektrik enerjisi tüketimi, Avrupa'ya göre dörtte biridir ve hızla artmaktadır. Yapılan tahminlere göre kişi başına tüketimin yıllık artışı, önümüzdeki senelerde %9 civarında olacaktır. Bu artışın, ülkenin ekonomik gelişmesinden çok, Türk insanının sosyal ihtiyacından kaynaklandığı 1994 yılının durumundan anlaşılmaktadır. 1994 yılında ekonomi %4 gerilerken elektrik enerjisi tüketimi %7 artmıştır. Ayrıca 1995 senesinde %10' dan fazla bir artış izlenmiştir. Bu durumda önümüzdeki senelerin yıllık %9 tüketim artış tahminin gelecekteki ekonomik konjonktürü fazla bağlı olmayacağına inanılmaktadır. Bu artış yılda en az 3000 MW' lık üretim kapasitesi kurulması anlamına gelmektedir.

1970 yılında Türkiye' de toplam kurulu güç 2234.9 MW iken yıllık ortalama %9.42' lik bir artış ile 1997 yılı sonu itibariyle 21901 MW' a ulaşmıştır. Çizelge 2-2' de detayları yer almaktadır. Sanayi toplumlarında bir gelişmişlik endeksi olan kişi başına elektrik enerjisi tüketimi 1970 yılında 244 kWh iken bu değer 1997 yılı için 1543 kWh' a ulaşmıştır ve diğer gelişmiş ülkelerin endekslerine göre oldukça düşük bir değerdir (Sınar, 1998).

Sanayileşmekte olan ülkemizde elektrik enerjisi tüketimindeki artış enerji üretimine kıyasla daha hızlı olmaktadır. Bu durumu ve halen kurulmakta olan enerji santrallerinin devreye alınma

Çizelge 2.2 Türkiye'de elektrik enerjisi üretiminin gelişimi (Sınar,1998)

Yıllar	Termik Güç (MW)	Artış Oranı (%)	Hidrolik Güç (MW)	Artış Oranı (%)	Toplam (MW)	Artış Oranı (%)
1970	1.509,5	9,19	725,4	4,41	2.234,9	13,60
1971	1.706,3	10,16	871,6	5,19	2.577,9	15,35
1972	1.818,7	3,47	892,6	1,70	2.711,3	5,17
1973	2.207,1	12,27	985,4	5,48	3.192,5	17,75
1974	2.282,8	10,34	1.449,2	6,56	3.732,1	16,90
1975	2.407,0	7,00	1.779,6	5,18	4.186,6	12,18
1976	2.491,5	2,42	1.872,5	1,82	4.364,2	4,24
1977	2.854,6	5,02	1.872,6	3,30	4.727,2	8,32
1978	2.987,9	1,83	1.880,8	1,16	4.868,7	2,99
1979	2.987,9	2,99	2.130,8	2,14	5.118,7	5,13
1980	2.887,9	0,00	2.130,8	0,00	5.118,7	0,00
1981	2.181,3	-5,46	2.356,3	-5,89	4.537,6	-11,35
1982	3.556,3	24,80	3.082,3	21,50	6.638,6	46,30
1983	3.695,8	2,38	3.239,3	2,09	6.935,1	4,47
1984	4.584,3	11,91	3.874,8	10,07	8.459,1	21,98
1985	5.244,3	4,49	3.874,8	3,31	9.119,1	7,80
1986	6.235,2	6,72	3.877,5	4,18	10.112,7	10,90
1987	7.489,3	14,11	5.003,3	9,42	12.492,6	23,53
1988	8.299,8	9,27	6.218,3	6,94	14.518,1	16,21
1989	9.208,4	5,17	6.597,3	3,70	15.805,7	8,87
1990	9.550,8	1,88	6.764,3	1,34	16.315,1	3,22
1991	10.092,8	3,20	7.113,8	2,26	17.206,6	5,46
1992	10.334,9	4,84	8.378,7	3,92	18.713,6	8,76
1993	10.653,4	4,54	9.881,7	4,12	20.335,1	8,66
1994	10.992,7	1,35	9.864,6	1,22	20.857,3	2,57
1995	11.089,0	0,24	9.862,8	0,21	20.951,8	0,45
1996	11.312,1	0,75	9.934,8	0,66	21.246,9	1,41
1997	11.795,0	0,66	10.106,3	1,42	21.901,0	3,08

programını dikkate alınca yakın gelecekte ülkemiz için elektrik enerjisi sıkıntısı ortaya çıkmaktadır. Kısa vadede sorunun tek çözümü, özel sektörün çok sayıda ve kısa bir süre içerisinde kurabileceği küçük boy kojenerasyon tesisleridir. Ancak bu çözüm sanayici için kısa vadede cazip görülse bile, büyük santrallerden verim alınamayacağından, ülkemiz için maliyeti yüksek olan bir çözüm olduğunu hatırlatmak gerekir.

Diğer önemli bir nokta ise TEK' ten alınan elektrik fiyatı ve kojenerasyon sisteminde kullanılacak yakıt fiyatının arasındaki fark azaldıkça karlılık azalacak ve belki de zarar gündeme gelecektir. Bu yüzden elektrik ve yakıt, fiyatlarının yıllara göre değişimini incelemek gerekmektedir. Fiyatların devlet tarafından belirlenmesi yerine piyasa şartlarında belirlenmesi sonucu 1989'dan sonra fiyatlarda büyük artışlar olmuştur.

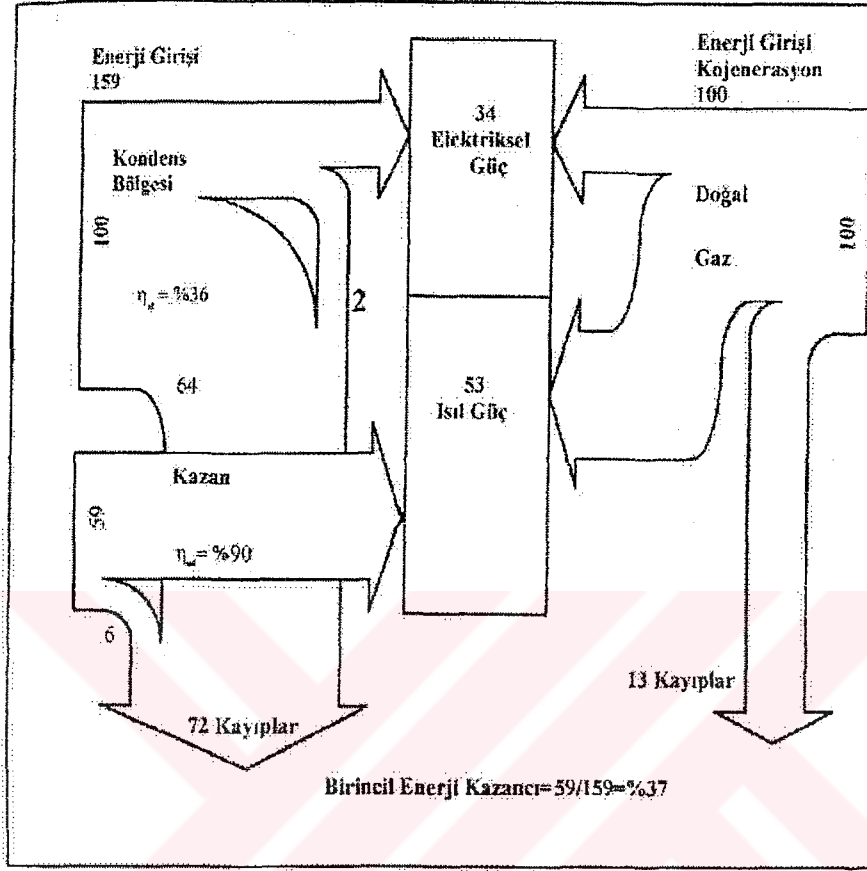
2.2. Kojenerasyon nedir?

Birleşik ısı ve güç üretimi olarak da tanımlanan kojenerasyon, ısı ve güç üretimini tek bir tesisten sağlayan teknoloji olarak bilinir. XX. yüzyılın başlarında kullanılmaya başlanmasına rağmen, 1970'lerden sonra ekonomik ve ekolojik duyarlılıkların artmasıyla daha önemli hale gelmiştir. Asıl teknolojik gelişmesi ise son yıllarda meydana gelmiştir. Kojenerasyon sistemleri genellikle yüksek sıcaklıkta çalışan çevrimler için uygundur. Bu çevrimlerde yüksek sıcaklıktaki ısı kızgın ve/veya doymuş buhar üretiminde, endüstri prosesinde, soğutma ve ısıtma ünitelerinde veya doğrudan kurutma amacıyla kullanılabilir. Isı enerjisinin iletimi sırasında, taşıyıcı ortam olarak sıcak su veya buhar kullanılmaktadır. Bu seçim tüketicini talebine ve iletim hattının ekonomik dizayn durumuna göre değişmektedir. Kojenerasyon sistemleri dizel, fuel-oil, doğalgaz, propan (LPG), çöplük gazı, arıtma gazı gibi sıvı veya gaz yakıtları ile çalışmaya uygundur (Ağabay, 1994).

Isı ve mekanik enerjinin ayrı ayrı üretildiği klasik tesislerin toplam faydalı enerji yönünden yararlanma oranı %55-65 civarında olmasına karşılık kojenerasyon tesislerinde %80-90 civarındadır.

Şekil 2.1'de konvansiyonel ve kojenerasyon sistemleri ile enerji üretimi bir Sankey diyagramı üzerinde karşılaştırılmıştır. Görüleceği üzere, 40 birim elektriksel, 50 birim ısı güce ihtiyacı olan bir tesisin bu ihtiyaçlarını karşılamak için konvansiyonel sisteme 168 birim enerji gerekirken, kojenerasyon sistemi ile 100 birim enerji yeterli olmaktadır.

Kojenerasyon sisteminin ana amacı tüm ısı makinelerinin çevreye verme zorunda oldukları atık ısıdan yararlanmaktır.



Şekil 2.1 Kojenerasyon ve konvansiyonel sistemlerle enerji üretimlerinin Sankey diyagramıyla karşılaştırılması (Koçak ve Gülşen, 1998)

Kojenerasyon tesisleri yurdumuzda da kullanılmaktadır. Fakat henüz batılı ülkelerdeki kadar çok fazla yaygınlık kazanmış değildir. Bu konudaki eksikliklerin giderilmesi ancak enerji üretiminin ekonomik ve çevresel etkilerinin doğru bir şekilde analiz edilmesine bağlıdır. Yurdumuzda kullanılan kojenerasyon tesislerinde ana tahrik elemanı olarak gaz türbinleri ve gaz motorları revaçtadır. Ana tahrik ünitelerinde en yeni teknolojiler ise; “yakıt hücreleri” ve “mikro türbinler” ve bunların birlikte oluşturdukları “karma sistemlerdir.”

2.3 Kojenerasyon-Çevre İlişkileri

Enerji-çevre ilişkisi ile ilgili Aybers ve Şahin (1995) tarafından verilen bilgiler aşağıda özet olarak sunulmuştur. Enerji sistemlerinin mukayesesinde maliyet tek kriter değildir ve

kıyaslama yapılırken çevre etkileşimleri de önemlidir. Çevreyi temizlemek için sonradan yapılacak olan masraflar enerji sistemlerinin maliyetini dolaylı olarak etkilemektedir. Çevre bakımından üzerinde durulması gereken sorunlar 4 ana kısma ayrılabilir.

Bunlar sırasıyla:

- Asit yağmurları,
- Ozon delikleri,
- Sera etkisi,
- Nükleer radyasyonlardır.

Fosil yakıt kullanan enerji üretim tesislerinin neden olduğu asit yağmurlarına SO_2 ve NO_2 gibi baca gazları neden olmaktadır. Asit yağmurları, ormanların ve bitki örtüsünün tahrip olmasına, durgun suların kirlenmesine neden olmaktadır.

Almanya’da asit yağmurları nedeniyle bazı ormanların %54 oranında tahrip olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle, bu ülkede son birkaç yılda 12 Gwe toplam gücündeki bazı kömür santralleri kapatılmış ve 70 bölgeye dağılmış bulunan 37 GWe toplam gücündeki kömür santraline “desülfirizasyon” ve “katalitik denitrifikasyon” tesisleri kurdurulmuştur. Bu ilave tesisler elektrik üretim maliyetini %20-%25 arttırmış ve Alman endüstrisine birkaç milyar DM parasal yük getirmiştir. Almanya da 1993 yılından itibaren SO_2 için 400 mg/Nm^3 ve NO_2 için 200 mg/Nm^3 sınır değerinin aşılmasına karar verilmiştir.

Oksijen molekülünün foto dissosiyasyonu ile stratosfer tabakasında oluşan ozon tabakasının sınır ötesi ışınlarını tutmak ve dünyayı direk güneş ışınları radyasyonlarından korumak gibi önemli bir rolü vardır. Ozon tabakasının bozulması “Cholorofluocarbon (CF_xCl_y)”lerin katalitik etkisi ile olur. İnsanlar tarafından atmosfere bırakılan bu gazlar, CO_2 ’ye oranla yaklaşık 15000 kere daha fazladır.

Dünya üzerinde “sera etkisi” ile dünyanın ısınmasına neden olan gazlar sırasıyla, su buharı, bulutlar, CO_2 , CH_4 , N_2O , O_3 ve CF_xCl_y gazlarıdır. Bu gazlar dünya kabuğundan geri neşredilen kızıl ötesi ışınları tutmak suretiyle, dünya kabuğunun sıcaklığının artmasına neden olurlar. Ekim 1985’de düzenlenen bir konferansta 2030 yılında atmosferdeki CO_2 konsantrasyonunu iki katına ulaşacağı ve bu nedenle dünya kabuğunun ortalama sıcaklığının $3^\circ\text{C} \pm 1,5$ kadar artmasıyla kutuplardaki buzulların erimesi neticesinde denizlerdeki su seviyesinin birkaç metre yükseleceği ileri sürülmüştür.

Sera etkisinin azaltılması için fosil yakıt tüketim hızının dolayısıyla CO₂ üretim hızının azalması gerekmektedir. Bu nedenle, 1988 Toronto Konferansında CO₂ üretiminin yılda %1 azaltılmasına çalışılması karar altına alınmıştır. Bu amaca ulaşabilmek için fosil yakıt enerji üretimi tesisleri daha ucuz elektrik üretiyor olsalar bile, bunları büyük oranda kullanmaktan kaçınmak gerekmektedir. Ancak doğalgaz aynı ısı miktarı için, kömüre nazaran %57 nispetinde daha az CO₂ üretir ve kombine gaz-buhar çevrimiyle %50 termik verimle elektrik enerjisi üretmek mümkündür. Bu nedenle, günümüzde kombine doğalgaz çevrim santralleri sistemleri hızla yaygınlaşmaktadır. Nükleer santrallerin kömür santralleri yerine kullanılabilecek iyi bir alternatif olduğu söylenebilir.

Cinsi ne olursa olsun, enerji sistemlerinin çevre üzerinde etkisi vardır. Bu etkinin fosil yakıt kullanan santrallerde çok yüksek olduğu bilinmektedir. Kömür çıkarılmasındaki kazalar, petrol taşıma kazalarının çevre üzerindeki etkileri ile birlikte baca gazlarının insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri dikkate alındığında fosil yakıtlı santrallerin çevreye etkisi zannedildiğinden daha fazladır. 1000 MW_e gücündeki bir kömür santrali, yılda 3 milyon ton kömür tüketir, ve 7 milyon ton CO₂, 120.000 ton SO₂, 20.000 ton NO_x üretir. Fuel oil enerji üretim tesisleri için durum çok farklı değildir. Ancak santrale muhtelif ekipmanlar ilave edilerek emisyon seviyeleri kontrol edilebilir. Bu işlem enerji üretim maliyetini %20 ile %25 kadar arttırmaktadır.

Mevcut tüketim hızıyla dünyada 100-200 yıl yetecek kadar kömür 40-50 yıl yetecek kadar petrol ve doğalgaz rezervleri olduğu bilinmektedir. Bu enerji kaynaklarının çevre üzerindeki olumsuz etkileri de dikkate alındığında alternatif temiz enerji kaynaklarına yönelmek zorunluluğu olmakla birlikte, bu kaynaklarla kısa ve orta vadede toplam talebi karşılamak mümkün görülmemektedir ve gelecek yıllarda fosil yakıt santralleri yerine daha fazla nükleer santral kullanılmaya başlanması beklenmektedir.

Temiz enerji kaynaklarından olan güneş ve rüzgar gibi sonsuz denebilecek bir potansiyele sahip 'yenilenebilir enerji kaynaklarından büyük ölçekte ekonomik olarak elektrik enerjisi üretim teknikleri henüz gelişmemiş olmasına rağmen, bu kaynakların uzun dönemde ekonomik olarak elektrik enerjisi üretiminde kullanılabileceği ümit edilmektedir. Bugün için yenilenebilir kaynakların en önemlisi ve ekonomik olarak değerlendirilebileni hidrolik enerjidir. Ancak dünyanın hidrolik potansiyeli sınırlı olduğu için, bu kaynağın elektrik üretimi içinde %19 olan payının gelecekte azalması beklenmektedir. Pahalı olmaları ve büyük güç

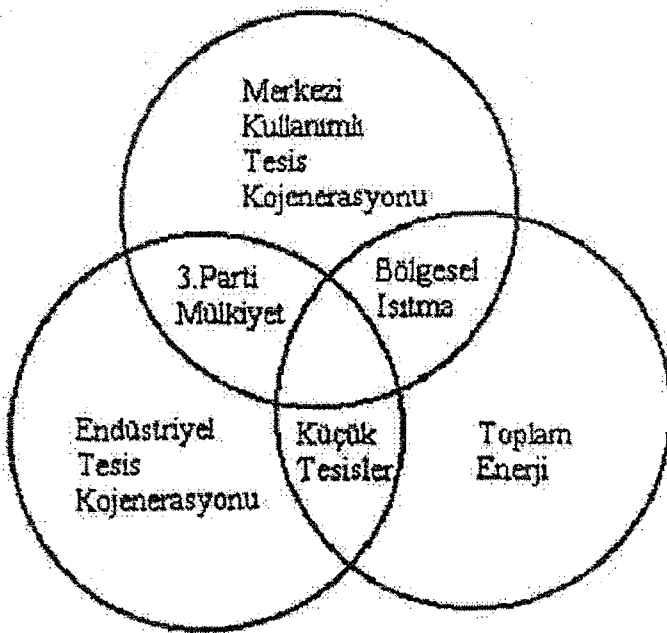
ölçeklerinde kullanılamamaları nedeniyle hidrolik dışındaki diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payı %3 kadardır. Bu durumda 2020 yılında 30000 TWh olması beklenen dünya elektrik talebinin %52'si termal, %26'sı nükleer, %16'sı hidrolik ve %6'sının diğer santrallerle karşılanması mümkün görünmektedir.

Yukarıda verilen bilgiler en önemli çevre kirleticilerin fosil yakıtlı santrallerden kaynaklandığını göstermektedir. Bu nedenle bu santrallerin enerji üretim verimliliğinin artırılarak emisyonun azaltılması yönünde bilimsel çalışmaların yapılarak, gerekli teknolojilerin geliştirilmesine hız verilmesi oldukça önemlidir. Kojenerasyon tesisleri bu konuda yapılan çalışmaların bir ürünü olmakla beraber çevresel etki yönünden daha da geliştirilebilir. Sunulan bu çalışmanın amacı da bu çerçevede değerlendirilmelidir.

2.4 Kojenerasyon Yaklaşımları

Wilkinson ve Barnes (1993) tarafından kojenerasyon yaklaşımlarıyla ilgili olarak verilen bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

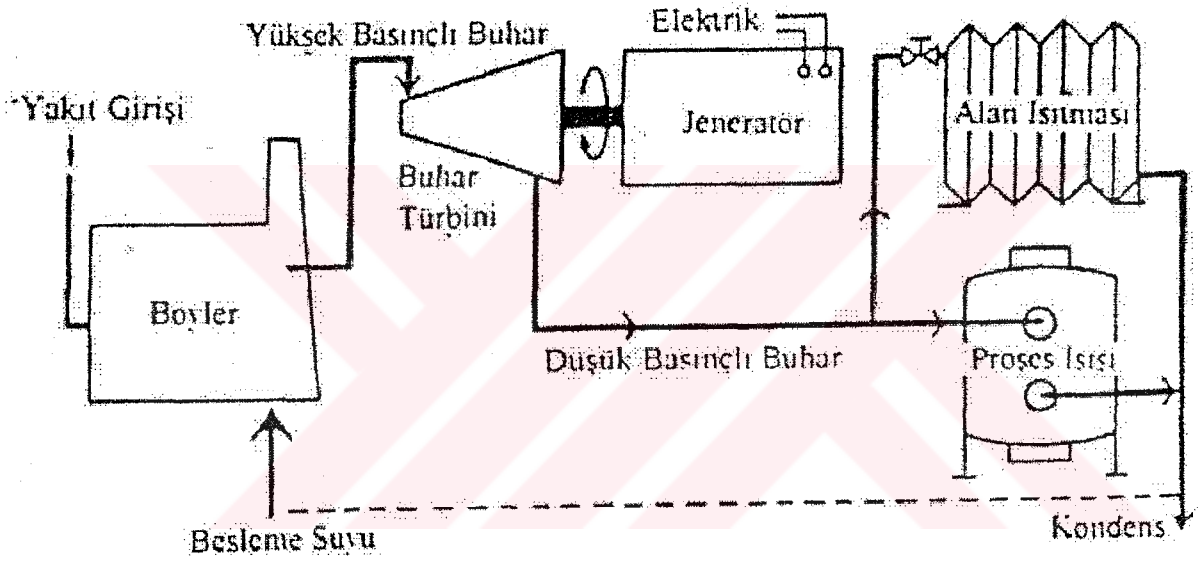
Kojenerasyon sistemleri merkezi ısıtma, endüstriyel ve toplam enerji sistemleri olmak üzere üç kısma ayrılmaktadır. Bu kojenerasyon sistemlerinin birbiriyle olan ilişkileri Şekil 2.2'de görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere çalışma bölgeleri biri birleriyle örtüşebilmektedir.



Şekil 2.2 Kojenerasyonun formları

2.4.1 Merkezi Kullanımlı Tesisler

Büyük merkezi ısı ve güç tesislerinde kojenerasyon (Şekil 2.3), ticari ve konutsal binalarda alan ısıtması ve sıcak su elde edilmesi ve endüstri tesislerinde düşük sıcaklıkta proses ısısı veya her ikisini sağlar. Bu sistemler aynı anda ısı ve elektrik üretirler. Son yıllarda bölgesel ısıtmada küçük, tek amaçlı, düşük basınçlı buhar üretimi yerine; büyük, yüksek basınçlı ısı ve elektrik üretim sistemleri tercih edilmektedir. Çift amaçlı sistemlerin yatırım, işletme ve bakım maliyetlerinin daha kompleks ve yüksek olmasına rağmen, enerji üretim verimliliğinin yüksek olmasından dolayı yakıt masrafları diğer sistemlere göre daha düşük olmaktadır.



Şekil 2.3 Merkezi ısı ve güç kojenerasyon sistemi

2.4.2 Endüstriyel Tesisler

Endüstride "kombine ısı ve güç üretim sistemleri" kapasite bakımından üç kısma ayrılmıştır. Bunlar;

Büyük ve Orta Endüstri Kojenerasyon Sistemleri: Petrol rafineleri, kağıt ve kağıt hamuru, kimyasal tesislerdir. Bu sistemlerin elektrik kurulu kapasitesi 25 MW'dan daha büyüktür. İşletmenin yüksek proses ısısı talepleri için kullanılmaktadır.

Küçük Endüstri Sistemleri: Elektrik üretim kapasiteleri 50 kW ile 25 MW arasında değişen endüstri sistemleridir. Gelecek 10 yıl içerisinde sektörde önemli bir yer alması beklenmektedir.

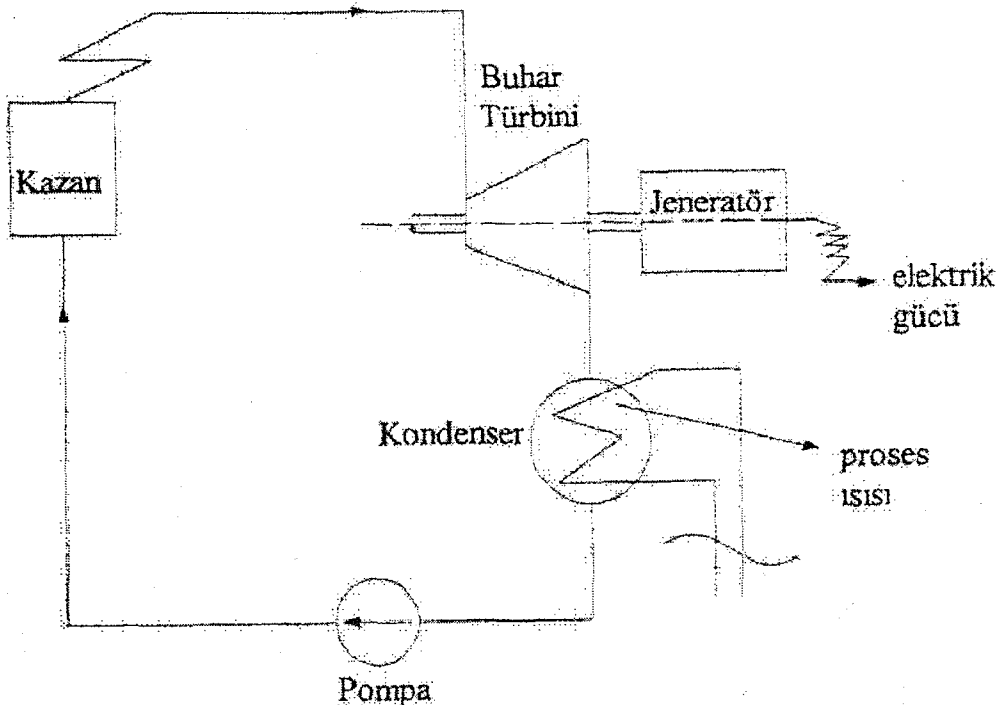
2.5 Kojenerasyon Teknikleri

2.5.1 Buhar Türbinli Kojenerasyon

Buhar türbinleri, akışkanın ısı enerjisini kinetik enerjiye, kinetik enerjiyi ise mekanik enerjiye dönüştüren makinelerdir. Diğer kombine ısı ve güç üretim teknolojilerinden farklı olarak, bir buhar türbine mevcut bulunan yakıt kaynağını direkt olarak elektrik gücüne çeviremez. Ancak kendisine yüksek basınçlı buhar sağlayacak bir kazana veya bir atık ısı kazanına ihtiyaç duyarlar. Bu makinelerde kullanılan doymuş buhar kazanları, küçük tesislerde düşük güç üretiminde, kızgın buhar kazanları ise büyük tesislerde daha fazla güç üretimi için kullanılır. Sadece buhar türbinlerinden oluşan kojenerasyon sistemlerinde kullanılan yöntemler aşağıda verilmiştir.

2.5.1.1 Karşı Basınçlı Buhar Türbini Kojenerasyon

Bu sistemler genel olarak bir kazan ve bir karşı basınçlı buhar türbininden oluşmuştur. Kazanda üretilen yüksek basınç ve sıcaklıklı buhar, bir motoru döndürmek üzere buhar türbinine gönderilir. Türbin bir jeneratörü tahrik eder ve elektrik üretilir. Türbini terk eden düşük sıcaklık ve düşük basıncındaki buhar bir proses uygulamasında kullanılabilir. Şekil 2.5’de karşı basınçlı bir sistem görülmektedir.

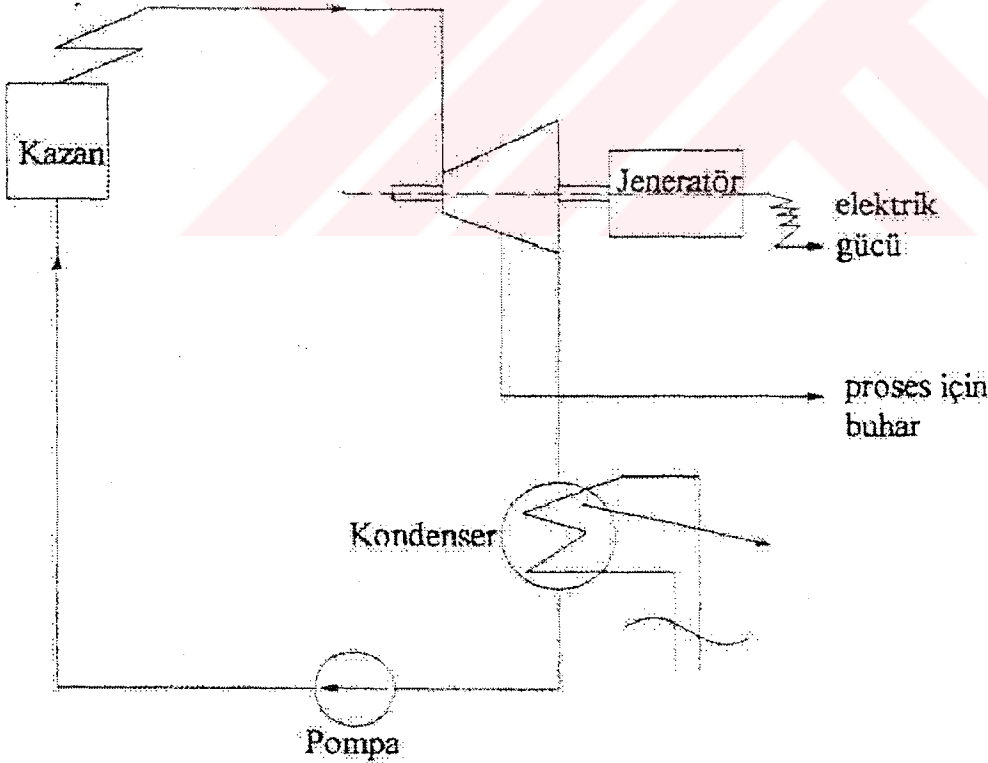


Şekil 2.5 Karşı basınçlı buhar türbini kojenerasyon sistemi

Karşı basınçlı sistem, türbin çıkışındaki basıncın yüksek tutulması prensibine dayanır. Türbin çıkışında akışkan yoğusturucu yerine ısı değiştiricisine girer. Çıkış basıncı yüksek olduğundan yüksek entalpi değerine sahip olan akışkan ısı değiştiricisinde ısıl proses amacıyla kullanılır. Buna karşılık sistemden elde edilen iş miktarı azalır. Bu sistemler, proses buharının ve elektriğin ayrıık üretildiği klasik sistemlere göre talep edilen güç/ısı oranına bağlı olarak %10-30 daha fazla enerji yararlanma oranına sahiptir.

2.5.1.2 Ara-Buhar Almalı Buhar Türbini Kojenerasyon

Karşı basınçlı kojenerasyon sisteminin alternatifi olarak aynı tarzda çalışan, ancak endüstriyel bir proseste kullanmak için orta kademelerde farklı basınç ve sıcaklıklarda buhar gereksinimi olan durumlarda ara buhar almalı kojenerasyon sistemleri kullanılır. Türbine giren buhar belirli bir basınca kadar genişledikten sonra bir kısmı proses ısı değiştiricisine gönderilmekte ve burarla talep edilen ısı ihtiyacının karşılanması için kullanılmaktadır. Şekil 2.6'da ara buhar almalı bir kojenerasyon sistemi görölmektedir.



Şekil 2.6 Ara buhar almalı buhar türbini kojenerasyon sistemi

Ara buhar almalı santraller sistemden çekilen buhar miktarını değiştirmek suretiyle değişik ısı/elektrik oranı değerlerinde çalıştırılabilir. Dolayısıyla ısı gereksiniminin değişken olduğu

durumlarda karşı basınçlı sisteme göre daha uygun bir sistemdir.

2.5.2 Gaz Türbinli Kojenerasyon

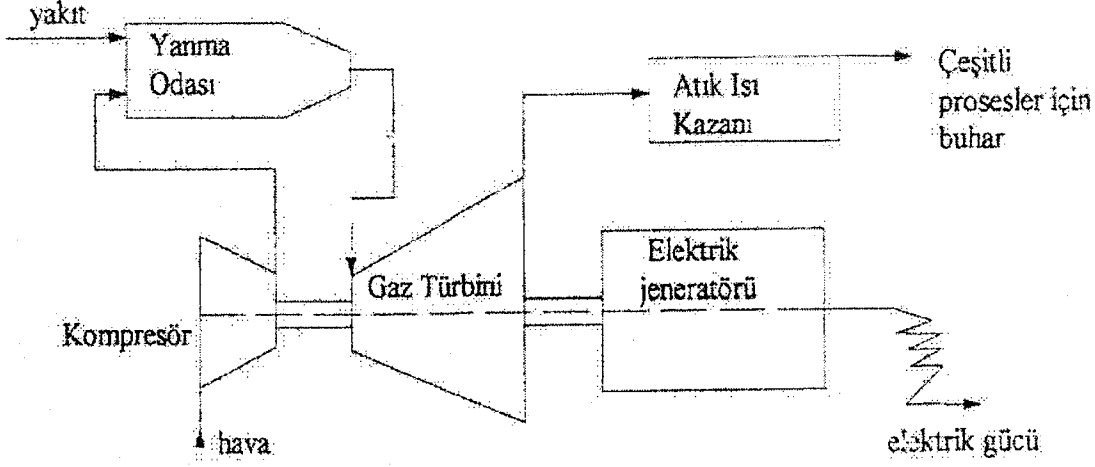
Gaz türbinleri dünyanın her tarafında tek bir yakıt kaynağından eş zamanlı olarak yararlı ısı ve güç üretiminde önemli bir rol almaktadır. Bugün gaz türbinleri 500 kW'dan yüzlerce MW'lık kapasitelere sahiptirler. Kojenerasyon teknolojisinin vazgeçilmez bir parçası olarak kabul edilen gaz türbinleri, elektriği kendi jeneratörlerinden elde ederler. Aynı zamanda ısıl proseslerde kullanılabilecek ısıyı ise türbinden egzoz edilen atık enerjiden üretirler. Bu sistemin çevreye daha az zarar vermesi için düşük emisyonlu doğalgaz kaynaklı kojenerasyon uygulamaları için araştırma-geliştirme çabaları ise sürmektedir. Gaz türbini büyük ölçekli ısı ve elektriğin birlikte üretildiği sistemler için kullanılır. Gaz türbini, bir veya daha fazla yanma odasında yakılan yakıttan üretilen yüksek basınç ve sıcaklıklı yanma gazları ile bir motorun ve buna bağlı şaftın dönmesiyle mekanik güç üretir.

Gaz türbinli kojenerasyon sisteminde kompresör tarafından emilen hava sıkıştırılır. Basıncı yaklaşık 12 kat artan havanın sıcaklığı da yükselir. 150 °C civarındaki hava yanma odasına gelir. Diğer yandan yanma odasına yüksek basınçlı yakıt (Doğalgaz, LPG, Motorin) püskürtülür. Yakıt-hava oranı yaklaşık 1/60'dır. Yani 60 birim hava ile 1 birim yakıt yanma odasında yüksek basınç altında yanar. Yanma sonucunda yüksek basınçlı ve 900 °C ile 1200 °C sıcaklığında yanma gazları açığa çıkar. Bu yüksek termal enerji potansiyeline sahip gazların termal enerjisi gaz türbininde önce kinetik daha sonra mekanik enerjiye ve bir jeneratörle de elektrik enerjisine dönüştürülür. Türbini terk eden 400-600 °C civarındaki yaklaşık % 15 O₂ içeren egzost gazları atık ısı kazanından geçirilerek proses buharı elde edilir. Üretilen buhar miktarı kullanılan yakıt ve basınca bağlı olarak değişir. Buhar basıncı düştükçe kullanılan buhar miktarı da artar. Atık ısı kazanından atılan baca gazlarının sıcaklığı 200 °C civarındadır. Atmosfere atılan bu enerjiden de faydalanmak mümkündür. Atık ısı kazanı ile baca arasına konan bir ekonomayzer ile baca sıcaklığı 100 °C'ye kadar düşürülebilir.

2.5.2.1 Basit çevrimli Gaz Türbinli Kojenerasyon

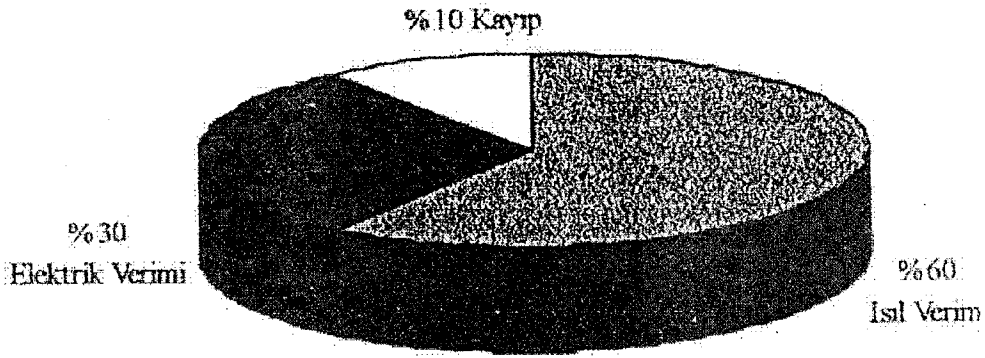
Gaz türbinleri çok farklı çevrim konfigürasyonlarıyla işletilebilir. Basit çevrimli gaz türbinli kojenerasyon tesisi bir tek şafttan tahrik olan hava kompresörü, yanma odası, gaz türbini,

türbine bağlı bir elektrik jeneratörü ve atık ısı kazanından oluşmaktadır. Basit çevrimli gaz türbinleri genellikle 25 MW' dan daha az güç üretiminde kullanılır. Şekil 2.7'de basit çevrimli bir gaz türbinli kojenerasyon sistemi şeması görülmektedir.



Şekil 2.7 Basit çevrimli gaz türbini kojenerasyon sistemi

Basit çevrimli gaz türbini kojenerasyon sistemlerinin enerji dağılımı Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Buna göre birincil enerji girdisi %100 alındığında elektrik verimi %30, ısı verim %60, kayıp ise %10 olmaktadır.



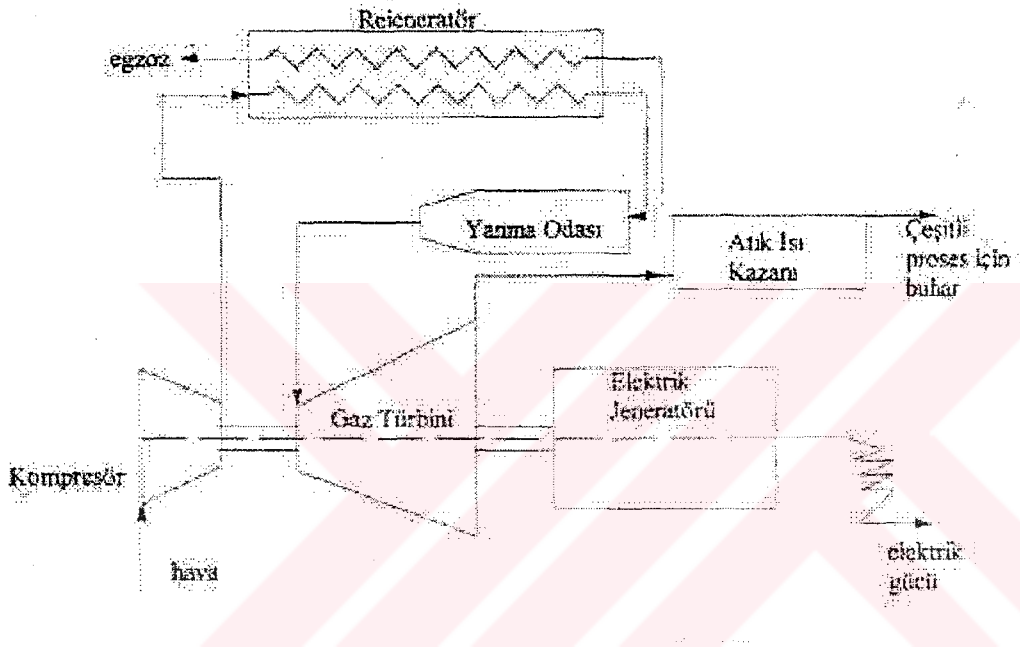
Şekil 2.8 Basit çevrimli gaz türbini kojenerasyon sistemi enerji dağılımı

2.5.2.2 Rejeneratör İlaveli Gaz Türbinli Kojenerasyon Sistemi

Basit gaz türbinli kojenerasyon sistemini iyileştirmenin çeşitli metotları vardır. Genel olarak iyileştirilmiş bir gaz türbini çevrimine, basit çevrimli gaz türbininden farklı olarak bir rejeneratör ilave edilmiştir. Bu rejeneratör gaz türbininden çıkan gazların egzoz enerjisini

kullanarak, kompresörden çıkan sıkıştırılmış havanın yanma odasına girmeden önce ön ısıtılma işlemini sağlar.

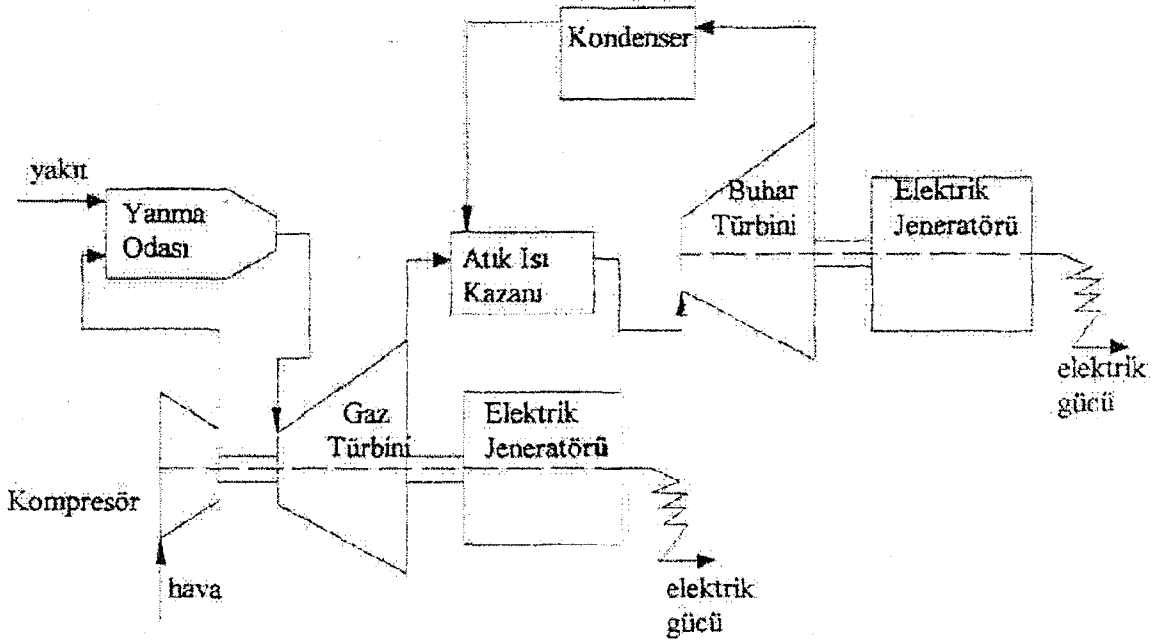
Kojenerasyonun uygulandığı bina, kurum veya işletmenin sabit "elektrik ve termik yükü" biliniyorsa, gaz türbinin egzoz gazları bir atık ısı kazanına verilir. Bu kazan ısıtma, soğutma ve diğer termik uygulamalar için buhar üretir. Bu tip işletmeler türbinin elektriksel ve termik kapasitelerini kullanarak performansını artırabilirler. Şekil 2.9'da rejeneratör ilaveli bir gaz türbini kojenerasyon sistemi akış şeması görülmektedir.



Şekil 2.9 Rejeneratör ilaveli gaz türbini kojenerasyon sistemi akış şeması

2.5.3 Kombine çevrimli Kojenerasyon Sistemleri

Bu sistemlerde atık ısı kazanında üretilen buhar, elektrik üretimini arttırmak için bir buhar türbinine ısı ve güç talep durumuna göre kısmen veya tamamen gönderilebilir. Bu gaz türbini sistemlerinde sıkça uygulanmaktadır. Kombine çevrimler yakıt enerjisinin %40 yada daha fazlasını elektriğe çevirebilmektedir. Eğer ilave yanma kullanılıyorsa kombine sistem, değişen ısı ve elektrik talebini karşılama esnekliğine sahiptirler. Gaz ve buhar türbininden oluşan kombine çevrim kojenerasyon tesisinin prensip şeması Şekil 2.10'daki gibidir.



Şekil 2.10 Kombine gaz-buhar türbinli kojenerasyon tesis şeması

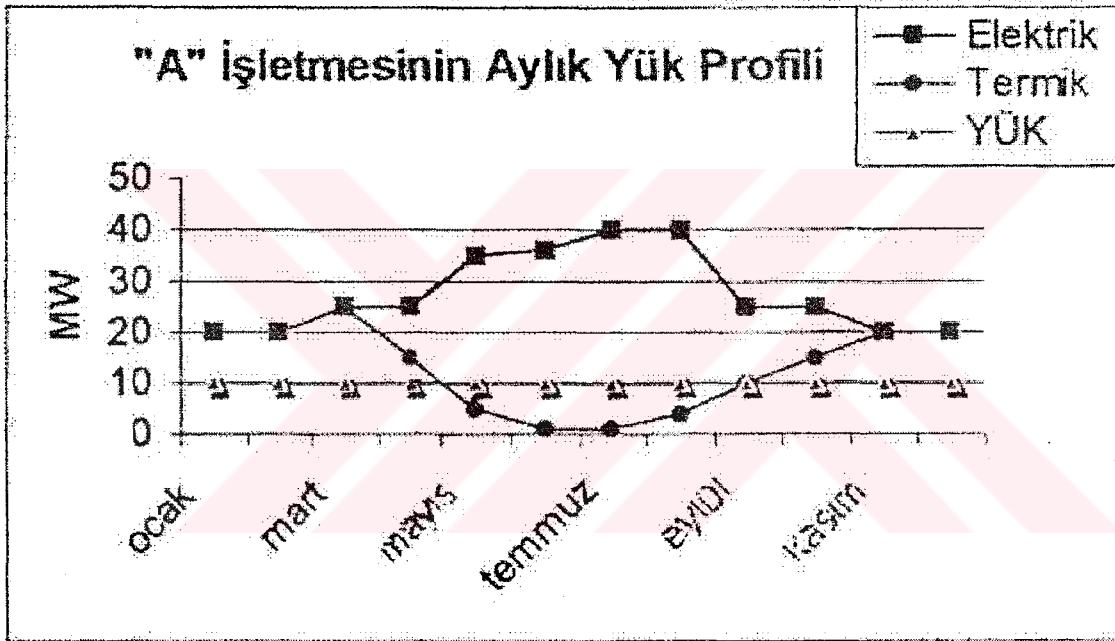
Termodinamik olarak kombine çevrim, Brayton üst çevrimi ile bir Rankine alt çevriminden oluşmaktadır. Brayton çevriminden açığa çıkan egzost gazındaki atık ısı, Rankine çevrimi için ısı kaynağıdır. Kombine çevrim, gaz türbininin yüksek giriş sıcaklığı ile buhar türbininin düşük çıkış sıcaklığı avantajını bir araya getirerek yüksek verimli güç üretimi sağlar. Bu sistemde ısı talepleri, istenilen buharın termodinamik özelliklerine göre ya doğrudan atık ısı kazanından ya da buhar türbininden çekilen buharla karşılanabilir.

Kojenerasyon sisteminde atık ısı kazanı prosese gerekli buharın az bir miktarını sağlar, ya da elektrik üretimini arttırmak için ve egzost gazı içerisindeki NO_x emisyonunu azaltmak için gaz türbinine, buharın kalitesinin iyi olması kaydı ile, buhar enjekte edilebilir. Enjekte edilen buhar miktarı arttıkça üretilen elektrik miktarı da artar. Atık ısı kazanında üretilen buharın bir kısmını doğrudan gaz türbinine enjekte etmenin en önemli avantajlarından biri değişen proses gereksinimlerine göre sistemin uyum gösterebilmesidir.

Bir işletme için ihtiyaç duyulan elektriksel ve proses ısı miktarlarının günlük, aylık ve yıllık bazda farklılıklar göstermesi olasıdır. Şekil 2.11'de verilen örnekte herhangi bir "A" işletmesinin elektrik ve ısı yükünün aylara göre değişimi görülmektedir. Yaz aylarında "A" işletmesinin ısı gereksiniminde şekildeki gibi azalma elektrik gereksiniminde ise artış görülmektedir. Bunun manası, yaz aylarında ısıtma işlemine ihtiyaç olmaması aksiyale

soğutma için ilave elektrik yüküne ihtiyaç duyulmasıdır. Bu durumda işletme gaz türbinini kısmi olarak çalışmaya zorlayacaktır ve elektrik yükünü ait olduğu şebekeden satın almak durumunda kalacaktır. Yada; gaz türbini tam yük altında çalıştırılacak ve tesisin büyük miktardaki buhar üretimi by-pass edilecek, bu ise tesis verimini düşürecektir. Her iki durum da istenmeyen özelliğe sahiptir.

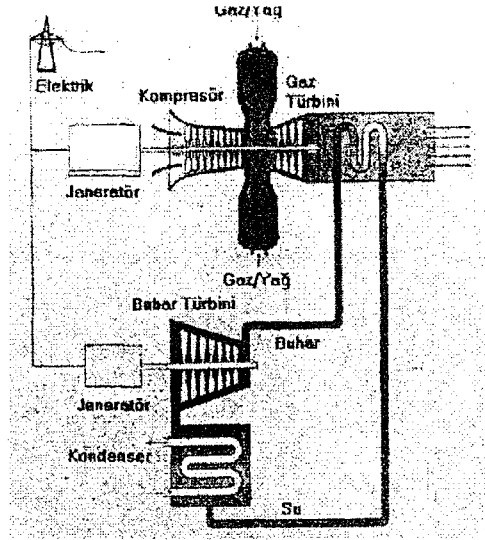
Mümkün olan tek çözüm ise, bu kojenerasyon sisteminin egzoz akışını değiştirerek elde edilen elektrik gücünü değiştirmektir. Bu tip işletmelerde bu aylık yük azalıp-çoğalması sorunu bir kombine gaz-buhar türbinli kojenerasyon sistemi ile çözümlenebilir.



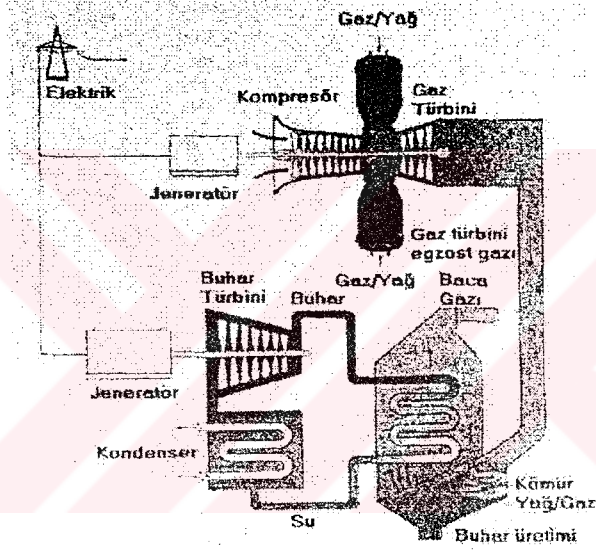
Şekil 2.11 A işletmesinin aylara göre yük değişim grafiği

Bir kombine çevrimin ana üniteleri, gaz türbini, kompresör, atık ısı kazanı, buhar türbini, kondenser ve türbinlere bağlı bulunan elektrik jeneratöründen meydana gelmektedir. Kombine gaz/buhar tesislerine ait akış şemaları Şekil 2.12, 2.13 ve 2.14' de görülmektedir.

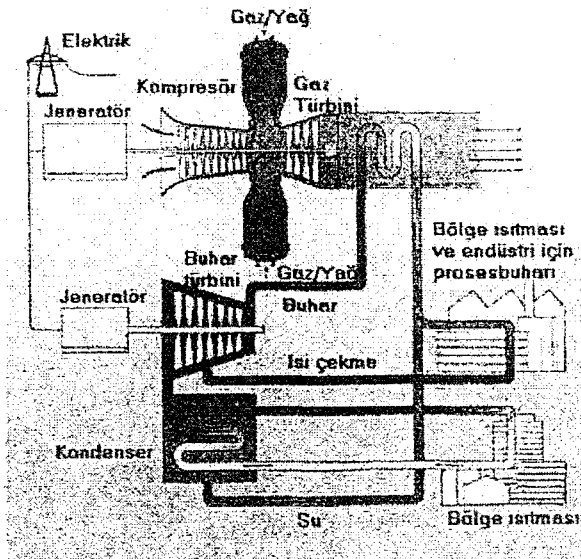
Elektrik yükünün daha fazla gerektiği periyotlarda atık ısı kazanından çıkan buharın tamamı veya büyük bir kısmı elektrik üretimi için buhar türbinine gönderilir. Buna karşılık ısı gereksiniminin fazla olduğu periyotlarda ise atık ısı kazanından elde edilen buharın tamamı veya büyük bir kısmı gerekli ısıl proses için kullanılır.



Şekil 2.12 Isı geri kazanımlı kombine gaz-buhar çevrim santrali



Şekil 2.13 Isı geri kazanımlı ve ara buhar almalı kombine gaz-buhar çevrim santrali



Şekil 2.14 Kombine gaz-buhar kojenerasyon sistemi

2.5.4 İçten Yanmalı Motor Kojenerasyonu

Motorlu kojenerasyon sistemleri, kullanılan yakıtın termik enerjisini elektriğe dönüştürüp açığa çıkan atık ısıya da kullanımına imkan vererek sistem veriminin artmasını sağlayan sistemlerdir. Kullanılan yakıtın %35-40'ı elektriğe, %45-50'si ise kullanılır termal enerjiye dönüşebilmektedir. Sadece %10-15'lik bir kayıp söz konusudur. Motorlu kojenerasyon sistemleri motor, jeneratör, ısı değiştiricileri ve elektrik enerjisi kullanım ekipmanlarından oluşur. Kombine ısı/güç sistemlerinde kullanılan motorlar otomobillerde kullanılan benzin ve dizel motorlara benzeyen içten yanmalı motorlardır. Kullanılabilir ısı/güç oranı temel olarak 0.5 ile 2 arasındadır. Egzost gazı geniş ölçüde fazla hava içerir. İlave yanma mümkündür ve bu oran 5'e çıkarılabilir.

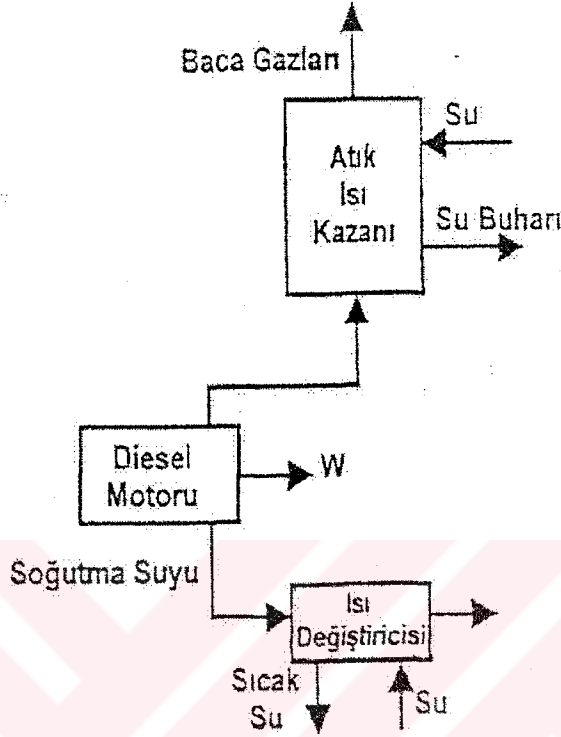
İçten yanmalı motorlar küçük kapasiteli kojenerasyon alanında hızlı bir şekilde gelişmektedir. Küçük çaptaki (1-10 MW arasındakiler) içten yanmalı motorların önemli bir bölümü yakıt olarak motorin veya benzin yakarlar. Bunlar daha çok besleme ünitesi olarak ya da ani güç kesintilerinde devreye girerek alternatif güç üretimi yapmak için kullanılırlar. Bugün, üreticiler çeşitli ölçülerde doğal gazlı, yüksek güçlü, ve yüksek verimli kojenerasyon paketleri sunmaktadırlar. Bu kojeneratörler, çeşitli küçük ve orta büyüklükteki tesis uygulamalarında kullanılırlar. Bu modeller sessiz ve temiz çalışan motorlar olup temel yük taleplerinde çeşitli işletmelerde kullanılabilir. Doğal gazlı içten yanmalı motor kojenerasyon paketleri, optimal elektrik ve termik yük verecek şekilde ve optimum tesis verimi ile birlikte kullanıcıya sunulmaktadırlar.

Bugün, doğalgazlı motor kojenerasyon tesis maliyeti 800-1500 \$/kW arasında değişmektedir. Bununla birlikte emisyonların azaltılması için uygun sayılabilecek bir kojenerasyon paketidir. İçten yanmalı motorlar 10 MW 'dan daha az kapasiteli kojenerasyon uygulamalarda optimal performans sağlar.

2.5.4.1 Dizel Motorlu Kojenerasyon

Dizel motorlu bileşik ısı güç üretiminde, motorun egzoz gazları bir atık ısı kazanından geçirilerek buhar veya sıcak su elde etmek için kullanılır. Ayrıca motorun soğutma suyundan da sıcak su üretimi için yararlanılabilir. Motordan soğutma suyu 120 °C civarında bir sıcaklığa sahip ısı kaynağı oluşturmaktadır. Bu sistemlerde elektrik üretim gücü 0.5 ile 10 MW, ısı verim ise %40-50 arasındadır. Dizel motorlu bileşik ısı güç üretiminde, elektrik ısı oranı

yaklaşık 1' dir. Burada da, atık gazlar ısı gereksiniminin az olduğu zamanlarda, yönlendirme mekanizmasıyla doğrudan atmosfere verilebilir. Bu motorlarda yakıt seçenekleri motorin, doğalgaz, LPG ve naftadır. Şekil 2.15' de dizel motorlu bileşik ısı güç sistemi görülmektedir.



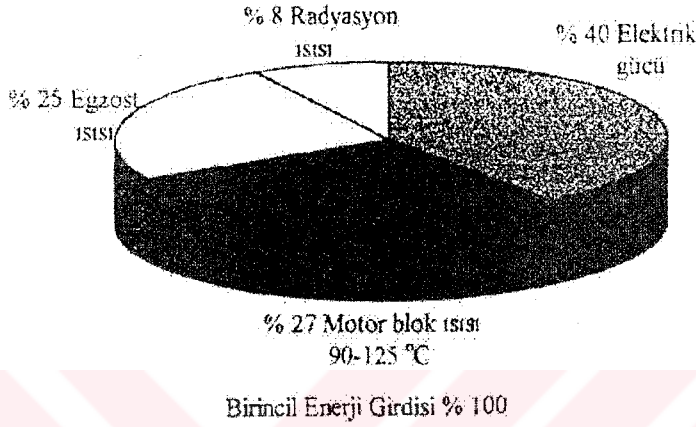
Şekil 2.15 Dizel motorlu birleşik ısı güç sistemi

Dizel motorlar iki ve dört zamanlı olmak üzere iki türde üretilirler. Dört zamanlı motorlar modül başına azami 20 MW' a kadar üretilirken, iki zamanlı motorlar modül başına azami 70 MW' a kadar üretim yapacak şekilde imal edilirler. Elektrik verimlerine göre; dört zamanlı motorlar % 44-45 civarında iken, iki zamanlı motorlar % 46-47 civarındadırlar.

İki zamanlı motorlar, verim yüksekliklerine rağmen ağır ve büyük olmayan ayrıca devir sayılarının düşük olması sonucu tahrik edilecek jeneratörün çok kutuplu olması nedeniyle, elektrik enerjisi üretmek için kara uygulamalarında daha az karşımıza çıkarlar. İki zamanlı motorların elektrik santrallerindeki uygulamaları, dört zamanlı motorlara göre sayıca azdır. Ağır yakıtla çalışan iki zamanlı dizel motorların, yakıtlarının ucuz, verimlerinin yüksek olması gibi üstün özelliklerine rağmen yakıtın içeriğindeki yüksek oranlı kükürt nedeniyle daha fazla kükürt oksit emisyonuna neden olurlar. İlk yatırımın yaklaşık %10-15' i civarında bir ilave maliyet ile baca gazı arıtma tesisi yapılarak baca gazındaki kükürt oksit emisyonu istenilen sınırlara çekilebilir.

2.5.4.2 Gaz Motorlu Kojenerasyon

Bu sistem özellikle elektrik ihtiyacı, ısı ihtiyacından daha fazla olan yani elektrik ısı oranı yüksek endüstriyel uygulamalarda, toplu konut, tatil köyleri, büyük oteller gibi sıcak su ve soğutma gereksinimi olan uygulamalarda optimum çözümler olarak karşımıza çıkmaktadır. Gaz motorundaki enerji dağılımı Şekil 2.16' daki gibidir.

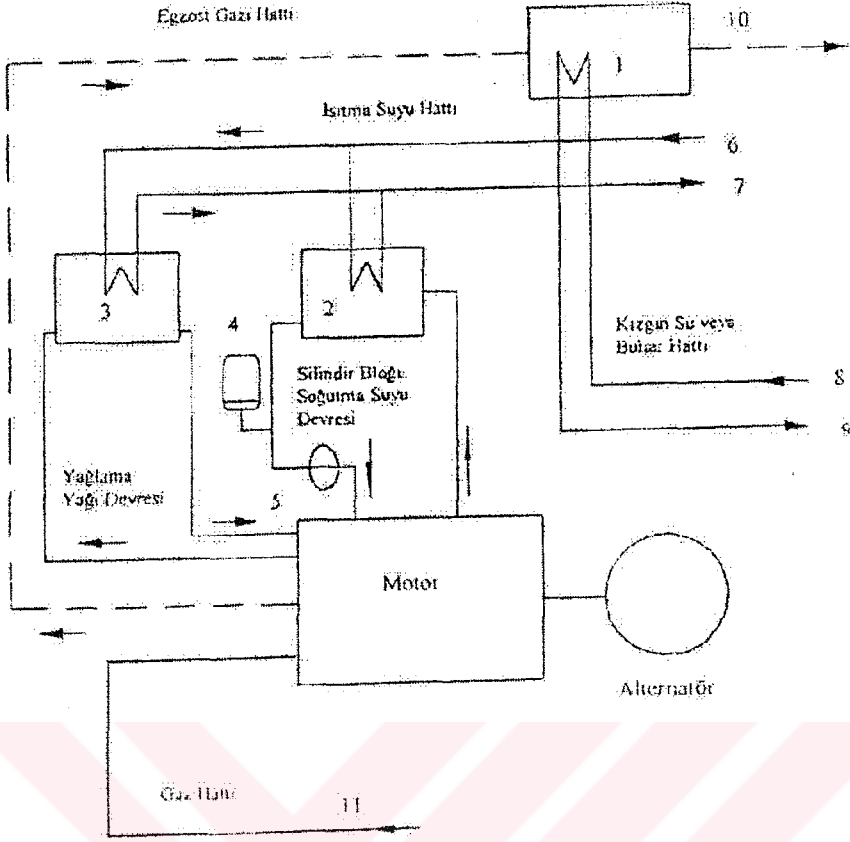


Şekil 2.16 Gaz motorunda enerji dağılımı

Yukarıda bahsedilen enerji dağılımından yola çıkarak, ortaya çıkan atık ısılardan gaz motorunun kojenerasyon amaçlı kullanımında ısı enerjisi üç unsurdan elde edilir. Bunlar; gaz motorunun yağlama devresi, egzost gazları ve silindir bloğu soğutma devresidir.

Şekil 2.17' deki gaz motorlu kojenerasyon sisteminin prensip şemasında;

1. Egzost gazı eşanjörü
2. Silindir bloğu soğutma suyu devresi eşanjörü
3. Yağlama devresi soğutma sı ısı değiştiricisi
4. Genleşme tankı
5. Soğutma suyu pompası
6. Isıtma suyu girişi
7. Isıtma suyu çıkışı
8. Kızgın su veya buhar girişi
9. Kızgın su veya buhar çıkışı
10. Egzost gazı çıkışı
11. Gaz girişini ifade etmektedir.



Şekil 2.17 Gaz motorlu kojenerasyon sisteminin prensip şeması

Gaz motoru uygulamalarının en önemli avantajları şunlardır:

- Bu sistemler elektrik ihtiyacının yanı sıra, ısıtma ve/veya soğutma amaçlı ısı enerjisi gereksinimi duyan uygulama alanlarında çok uygun çözümler olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrik tüketiminin ısı tüketimine oranla daha yüksek olduğu durumlarda tercih edilen sistemlerdir.
- %85-91 arasında değişen enerji yararlanma oranına sahiptirler.
- Fakir karışım veya katalizörlü yakma sistemleriyle emisyon seviyeleri oldukça düşük tutulabilmektedir.
- Çok modüllü konfigürasyonlara sahip gaz motorlu kojenerasyon sistemleri kısmi yük şartlarına uyum sağlayabilmektedir. Kısmi yükte çalışma durumunda verimin önemli miktarda etkilenmemesi ve modüllerin gerektiğinde sırayla devreye girip çıkma imkanları, sistemin elektrik ve ısı talebindeki değişimleri kompanse etmesine izin verir. Bu da günlük enerji maliyetlerinin minimize edilmesine yardımcı olur.

- Gaz motorunun kısa zamanda devreye alınıp, yine kısa zamanda devre dışı bırakılabilmesi bir avantajdır. Ayrıca gaz motorlu tesislerin yapım süresi diğer alternatiflerine göre daha kısadır.
- Bu tesislerde genellikle yakıt olarak doğalgaz kullanılmasına rağmen atık arıtma tesislerinden kanalizasyon gazı, çöp depolama tesislerinden çöplük gazı ve benzer şekilde yakıtlar da kullanılabilir.

2.5.5 Yakıt Hücreleri

Yakıt hücreleri güç üretimini pillerde olduğu gibi elektro-kimyasal yolla gerçekleştirirler. Tüketilecek yakıtı kimyasal yolla ayrıştırırlar. Yakıt hücreleri'nin hareketli elemanı veya hareketli yardımcı ekipmanı yoktur. Sessiz, temiz, sakın, ve yüksek termik verimli bir ısı ve elektrik üretim yöntemidir. Yakıt hücreleri çevre kirliliğini çok düşük seviyelerde tutmasına rağmen çoğu uygulamalar için hala çok pahalı bir sistemdir. Ekonomik uygunluğu ise oldukça yavaş biçimde ilerlemektedir. Yakıt hücreleri bu teknolojiye en son gelişme olup, gelecek vaat eden bir sistem tipidir. Yakıt hücreleri, hidrojen bakımından zengin olan yakıtları (örneğin doğalgaz) elektrik ve ısı enerjisine çevirir. Şekil 2.18' de bir yakıt hücresinin şematik resmi görülmektedir.

2.5.5.1 Yakıt Hücrelerinin Çalışma Prensibi ve Kullanılan Ekipmanlar

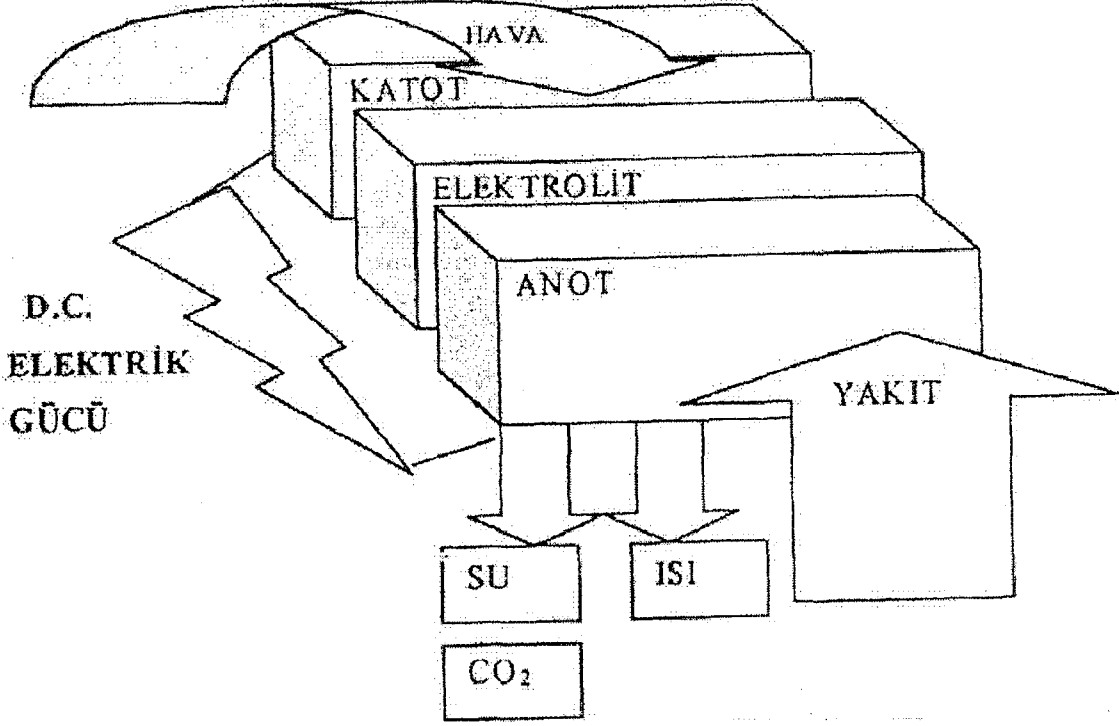
Bir yakıt hücresinin çalışmasını sağlayan üç tane ana kısım vardır;

1. Hidrojen Reformer : Yakıt kaynağından (doğalgaz, propan) hidrojeni alan yakıt işlemcisidir.
2. Yakıt Hücresi Dizileri: Elektrolit maddeler karşılıklı şarj edilen elektrotlar arasında bulunurlar. Yakıttaki hidrojenin enerjisi burada elektro-kimyasal reaksiyonla DC (doğru akım) elektrik gücüne çevrilir.
3. Inverter (Dönüştürücü): DC (doğru akım) olarak açığa çıkan elektriği AC (alternatif akım) güce çevirir.

Bugün geliştirilmekte olan yakıt hücrelerinden bazıları şunlardır;

Fosforik Asit Yakıt Hücresi(PAFCs):

Ticari olarak kullanılan ilk yakıt hücresi modeli olmasından dolayı en çok bilinenidir. Bir asit elektrolitine sahiptirler ve oldukça düşük sıcaklıkta işletilirler (205 °C civarında). Üretilen üniteler 200 kW elektrik gücünde ve 205 kW ısı gücü üretebilmektedirler.



Şekil 2.18 Yakıt hücresi şematik resmi

Erimiş (Dökme) Karbonat Yakıt Hücreleri (MCFCs):

Oldukça yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 590 °C) işletilirler. Bu sistemler daha büyük güç gerektiren uygulamalar için kullanılırlar. 50 MW-100 MW arasında değişen kapasiteleri mevcuttur. Yüksek sıcaklıklardaki egzoz gazları bir kombine çevrimde kullanabilirler ve bu sayede yaklaşık olarak %80'lik bir enerji yararlanma oranı elde edilebilmektedir.

Katı Oksit Yakıt Hücreleri (SOFCs):

Bu tip yakıt hücreleri de 590-980 °C gibi yüksek sıcaklıklarda işletilirler. Bu sıcaklıklarda, bir doğal gazla güçlendirilmiş yakıt hücresinin düzenleyiciye ihtiyacı yoktur. 20-25 kW arasında değişen kapasitelere sahip olan yakıt hücreleri test aşamasındadır. Hedeflenen ise bu kapasitenin 150 kW'a çıkartılmasıdır.

Proton Değiştirmeli İnce Zar Tipi Yakıt Hücreleri:

Bu tip yakıt hücreleri düşük sıcaklıklarda (yaklaşık 80 °C) işletilirler. Üreticilerin hedefledikleri ise kapasitelerinin 7 kW'dan 250 kW'a kadar değiştirilebilmesidir. Çok az gürültülü olmaları sebebiyle askeri jeneratör dizaynında önemli hale geleceği tahmin edilmektedir.

2.5.6 Mikro -Türbinler

Mikro türbin jeneratörleri küçük, az yer kaplayan türbinler olup kapasiteleri 30-100 kW arasındadır. Kombine ısı ve güç üretimi teknolojisinde kullanılabilen mikro-türbinler, 500 \$/KW-1500 \$/kW 'lık bir maliyetle kurulurlar. Makul bir verimle (ortalama %30) ve düşük bakım-tutum maliyetiyle, yakıt esnekliği sağlayabilmesi, termik enerjinin geri kazanımına izin vermesi ve düşük emisyonlu bir sistem olması avantajları arasında sayılabilir. Daha fazla güç gerektiğinde birden fazla ünite, eş zamanlı olarak isteğe göre çalıştırılabilir. Paralel şekilde de bağlanabilen bu güç üniteleri, işletmenin pik yük taleplerinde otomatik olarak devreye girip çalışmaya başlarlar.

2.5.7 Yakıt Hücresi- Mikro -Türbin Karma Sistemleri

Yakıt hücresi /mikro-türbin karma güç tesisi, tek başına dizayn edilen bir yakıt hücresine göre daha az birim maliyet e sahiptir ve yaklaşık olarak bir mikro-türbinden 2 kat daha verimlidir. Bu teknolojilerin %60'lık enerji yararlanma oranına vel000 \$/kW'lık bir maliyete ulaşması beklenmektedir.

Bu karma teknolojide, mikro-türbinin kompresörü yakıt hücrelerine yüksek basınçlı hava göndermek için kullanılır. Hava böylece doğalgaz ile reaksiyona girer ve elektrik enerjisini ve ısıyı elektro kimyasal proses sayesinde üretir. Yakıt hücresinin egzoz gazı, mikro-türbini daha fazla elektrik üretmesi için besler. Test aşamasında olan bu yeni teknoloji 60 kW' lık bir mikro-türbin ile 200 kW' lık bir katı oksit yakıt hücresi (SOFCs) ile yapılmaktadır.

3. TERMODİNAMİK ve EKONOMİK ANALİZ

3.1 Termodinamik Analiz

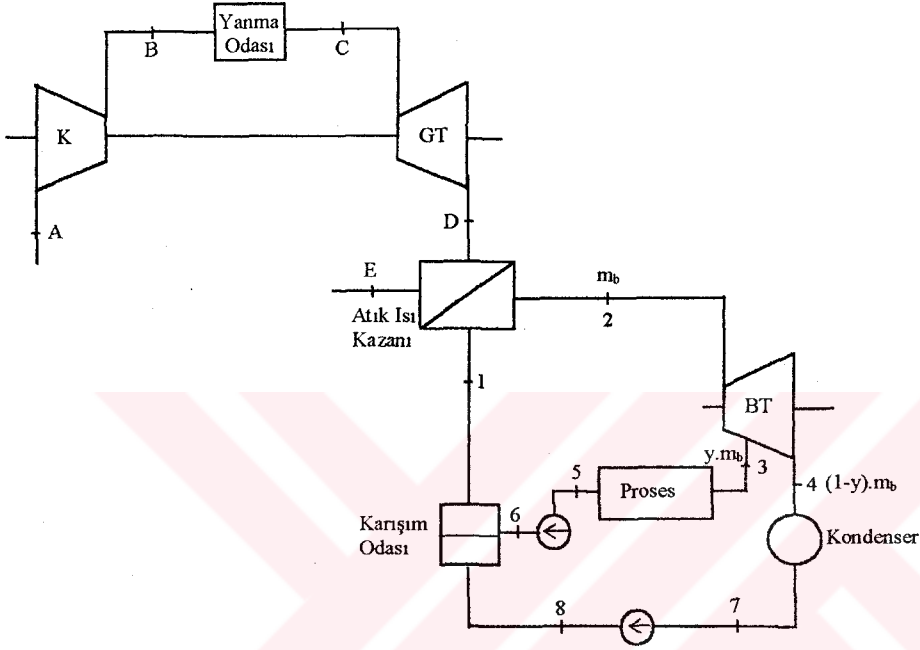
Mühendislik sistemlerinin büyük bölümünde enerji gereksinimi ısı biçimindedir. Kimya, kağıt, petrol, çelik, gıda ve tekstil gibi endüstrilerde ısı işlemler önemli bir yer tutar. Isıl işlemler için gerekli ısıya proses ısısı adı verilir.

Isıl işlemlerin yoğun olduğu endüstriler aynı zamanda büyük miktarda elektrik de kullanırlar. Bu bakımdan var olan iş potansiyelini, güç üretimi için kullanmak yerinde olur. Bu düşüncenin sonucu olarak, ısı işlem gereksinimlerini karşılarken elektrik de üreten santraller geliştirilmiştir. Bu santrallere Birleşik Isı Güç Santralleri (BIG) adı verilir. Bileşik ısı güç üretimi, ısı enerjisi ve elektrik gereksinimlerinin aynı enerji kaynağından karşılanmasıdır. Bir bileşik ısı güç santralinde, buhar türbinli çevrim (Rankine), gaz türbinli çevrim (Brayton) veya birleşik gaz buhar çevrimi (Kombine Sistem) kullanılabilir.

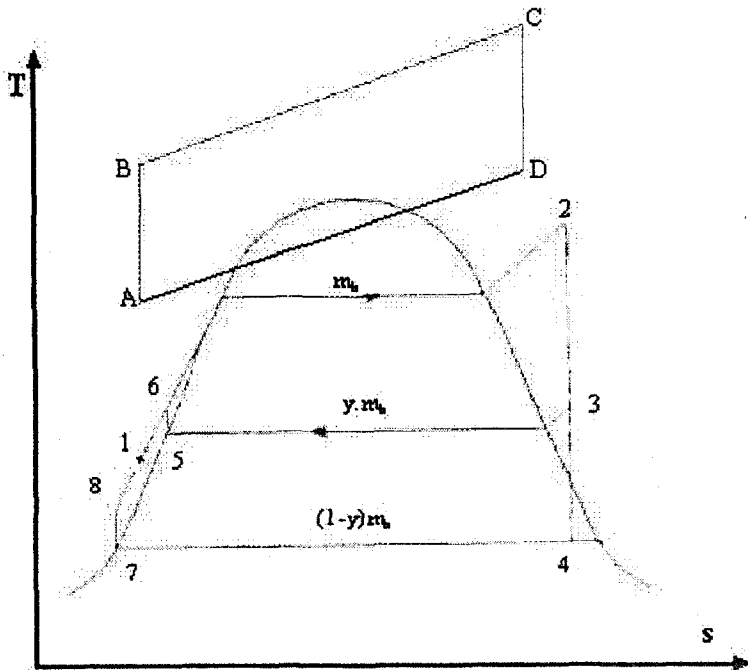
Şekil 3.1’ de şematik resmi verilen sistem ara buhar almalı kombine gaz/buhar türbinli bir BIG sistemidir. Bu sistemde üst çevrim gaz türbini çevrimi (Brayton) ve alt çevrim ise buhar türbini çevrimi (Rankine) olarak düşünülecektir. Şekil 3.2’ de bu sistemin T-s diyagramı verilmiştir. Şekillerdeki A, B, C, D, E harfleri gaz türbini çevrimindeki hal noktalarını, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 rakamları ise buhar türbini çevrimindeki hal noktalarını göstermektedir.

Şekil 3.2’de de görüldüğü gibi bütün durum değiştirmeler tersinir kabul edilmiş ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır. Gaz türbini çevriminde çevre koşullarındaki hava (A) kompresör tarafından sıkıştırılarak basıncı artırılır (B). Yüksek basınçlı hava ve yakıt karışımı sabit basınçta yanma odasında yanar ve sıcaklığı artar (C). Daha sonra akışkan gaz türbininden izantropik olarak D noktasına kadar genişler. D noktasında gaz türbinini terk eden yüksek sıcaklıktaki akışkan bir atık ısı kazanında E şartlarına kadar sabit basınçta gelirken 1 noktasında kazana giren su 2 noktasında kazanı kızgın buhar olarak terk eder. 2 noktasından itibaren buharın tamamı izantropik olarak genişlemeye başlar ve W_{bt} işi elde edilir. 3 noktasında buharın $y m_b$ kadarı proses ısı ihtiyacını karşılamak amacıyla çekilir ve 5 noktasına kadar genişlemeye devam eder. Kalan $(1-y)m_b$ miktarındaki buhar kondenser basıncına kadar izantropik olarak genişlemeye devam eder ve buhar türbininden bir miktar

daha iş elde edilmiş olur (W_{bt2}). Proses için kullanılan $y m_b$ iş akışkanı ve kondenserde yoğunlaşan $(1-y)m_b$ buharı pompalar ile karışım odasına basılarak çevrim tamamlanmış olur (5,6,7,8). Buna göre Brayton çevrimindeki ABCDE noktaları arasındaki durum değişimlerinin sürekli akışlı sistemlerle gerçekleştiği göz önüne alınıp, türbin ve kompresörde kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilirse aşağıdaki ifadeler elde edilir:



Şekil 3.1. Kombine kojenerasyon tesisinin şematik gösterimi



Şekil 3.2 Kombine gaz-buhar türbini çevriminin T-s diyagramı

B-C arasında, yani yanma odasında gaz türbinine ve dolayısıyla BIG sistemine verilen ısı miktarı;

$$\dot{Q}_v = \dot{m}_g c_p (T_C - T_B) \quad (3.1)$$

şeklinde bulunabilir. Burada $\dot{m}_g$ Brayton çevriminde dolaşan akışkanın kütleli debisi c_p ise özgül ısıdır.

Atık ısı kazanında (D-E) akışkandan çekilen ısı ve çevreye atılan ısı miktarları (E-A) aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\dot{Q}_{DE} = \dot{m}_g c_p (T_D - T_E) \quad (3.2)$$

$$\dot{Q}_{EA} = \dot{m}_g c_p (T_E - T_A) \quad (3.3)$$

Buna göre termodinamiğin birinci kanununda gaz türbininde elde edilen net iş;

$$\dot{W}_{gt} = \dot{Q}_v - \dot{Q}_{DE} - \dot{Q}_{EA} \quad (3.4)$$

şeklinde bulunabilir. (3.1), (3.2), (3.3) denklemleri (3.4)' de yerine konursa,

$$\dot{W}_{gt} = \dot{m}_g c_p (T_C - T_B) - \dot{m}_g c_p (T_D - T_A) \quad (3.5)$$

A-B ve C-D hal değişimleri izantropik ve $P_B = P_C$, $P_D = P_A$ olduğu göz önüne alınırsa,

$$\frac{T_B}{T_A} = \left(\frac{P_B}{P_A} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{P_C}{P_D} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_C}{T_D} = \theta \quad (3.6)$$

olur. Burada θ adyabatik sıcaklık oranı, $k = c_p/c_v$ özgül ısılar oranıdır.

(3.6) denklemi (3.5)' de yerine konursa

$$\dot{W}_{gt} = \dot{m}_g c_p (T_C - T_A \theta) - \dot{m}_g c_p \left(\frac{T_C}{\theta} - T_A \right) \quad (3.7)$$

düzenlenirse,

$$\dot{W}_{gt} = \dot{m}_g c_p T_A \left(\frac{T_C}{T_A} - \theta \right) - \dot{m}_g c_p T_A \left(\frac{T_C}{T_A} \frac{1}{\theta} - 1 \right) \quad (3.8)$$

veya

$$\dot{W}_{gt} = \dot{m}_g c_p T_A \left[\alpha \left(1 - \frac{1}{\theta} \right) - (\theta - 1) \right] \quad (3.9)$$

şeklinde elde edilir. Burada $\alpha = \frac{T_C}{T_A}$ gaz türbininde görülen en yüksek ve en düşük sıcaklıklar oranıdır.

Böyle bir basit gaz türbini tesisinin termik verimi ise,

$$\eta_{th,Brayton} = \frac{\dot{W}_{gt}}{\dot{Q}_v} = 1 - \frac{\dot{m}_g c_p (T_E - T_A)}{\dot{m}_g c_p (T_C - T_D)} \quad (3.10)$$

$$\eta_{th,Brayton} = 1 - \frac{1}{\theta} \quad (3.11)$$

şeklinde bulunabilir.

Atık ısı kazanında Termodinamiğin 1. kanunu uygulanırsa,

$$\dot{Q}_{DE} = \dot{Q}_{12} \quad (3.12)$$

olacaktır. Bu denklemde hal noktalarının entalpileri kullanılırsa aşağıdaki hali alır.

$$\dot{m}_g c_p (T_D - T_E) = \dot{m}_b (h_2 - h_1) \quad (3.13)$$

$$\frac{\dot{m}_b}{\dot{m}_g} = \frac{c_p T_A \left(\frac{\alpha}{\theta} - \psi \right)}{(h_2 - h_1)} \quad (3.14)$$

$$h_1 = y h_b + (1 - y) h_s \quad (3.15)$$

Burada $\psi = \frac{T_E}{T_A}$, $\dot{m}_b$ buharın kütleli debisidir. h_2 ve h_1 ise 1 ve 2 durumlarının entalpisidir. 2 durumundaki buhar 3 noktasına kadar buhar türbininde izantropik olarak genişler. Akışkanın izantropik olarak genişlemesi ile gelenen hal noktalarındaki (3 ve 4) entalpi ve entropi değerleri şu şekilde hesaplanabilmektedir:

$$x_i = \frac{s_2 - (s_f)_i}{(s_{fg})_i} \quad (3.16)$$

$$h_i = h_f + x(h_{fg})_i \quad (3.17)$$

Ara buhar alma işlemi öncesinde buhar türbininden alınan iş,

$$\dot{W}_{bt1} = \dot{m}_b (h_2 - h_3) \quad (3.18)$$

denklemleri ile hesaplanır. Daha sonra 3 noktasında buharın bir kısmı proses ısısı içe çekilir. Bu şekilde buharın miktarının toplam buhar miktarına oranı y olarak kabul edilirse proses için çekilen ısı miktarı,

$$\dot{Q}_p = y \dot{m}_b (h_3 - h_5) \quad (3.19)$$

olarak bulunacaktır. Geri kalan buhar türbinde 4 noktasına kadar genişlemeye devam edecek ve bu esnada,

$$\dot{W}_{bt2} = (1 - y)\dot{m}_b(h_3 - h_4) \quad (3.20)$$

gücü elde edilecektir. Buna göre buhar türbininde elde edilen toplam güç,

$$\begin{aligned} \dot{W}_{bt} &= \dot{W}_{bt1} + \dot{W}_{bt2} \\ \dot{W}_{bt} &= \dot{W}_b(h_2 - h_3) + (1 - y)\dot{m}_b(h_3 - h_4) \end{aligned} \quad (3.21)$$

olacaktır. Buhar türbininin çevriminde (Rankine) elde edilen net iş ise pompa işlerinin (3.21)'de verilen işten çekilmesi ile bulunur.

Pompa işi,

$$\dot{W}_p = y\dot{m}_b(h_6 - h_8) + (1 - y)\dot{m}_b(h_8 - h_7) \quad (3.22)$$

dir. BIG sisteminde elde edilen toplam güç (3.9) ve (3.21) denklemlerinde verilen güçlerin toplamı ile bulunur.

$$\dot{W}_T = \dot{W}_{gt} + \dot{W}_{bt} \quad (3.23)$$

Kojenerasyon sistemlerinde ekserji ve ekserji verimi kavramları önemlidir. Bu kojenerasyon sisteminde üretilen toplam ekserji miktarı,

$$\dot{E}_T = \dot{W}_T + \dot{E}_{QP} \quad (3.24)$$

şeklinde bulunabilir. Burada $\dot{E}_{QP}$ proses ısısının ekserjisidir ve aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$\dot{E}_{Q_p} = y\dot{m}_b(h_3 - h_4) \quad (3.25)$$

Sistemin ekserji verimi ise kojenerasyon sisteminden alınan ekserjinin yanma odasında sisteme verilen ekserjiye oranı şeklinde tanımlanabilir.

$$\eta_E = \frac{\dot{E}_T}{\dot{E}_{Q_v}} \quad (3.26)$$

Burada $\dot{E}_{Q_v}$ aşağıdaki gibi bulunabilir,

$$\dot{E}_{Q_v} = \dot{Q}_v \left(1 - \frac{T_A}{T_C} \right) \quad (3.27)$$

Kojenerasyon sistemlerinin karşılaştırmasında kullanılan önemli bir performans kriteri de enerji yararlanma oranıdır. Enerji yararlanma oranı (EYO) sistemden alınan ve proses için kullanılan ısı miktarlarının toplamının sisteme verilen ısı miktarına oranı şeklinde

tanımlanmıştır. EYO bize verilen enerjinin ne kadarından yararlanıldığını belirtmekte ancak, ısı ve iş enerjilerini aynı kalitede kabul etmektedir.

$$EYO = \frac{\dot{W}_t + \dot{Q}_p}{\dot{Q}_v} \quad (3.28)$$

Kullanılan diğer bir performans kriteri ise yapay termik verimdir. Sistemden alınan işin, sisteme verilen ısı ile proses için çekilen ısıнын farkına oranı şeklinde tanımlanmıştır.

$$\eta_T = \frac{\dot{W}_T}{\dot{Q}_v - \dot{Q}_p} \quad (3.29)$$

3.2 Ekonomik Analiz

Bir bileşik ısı güç santralının ekonomik analizinde; elektrik ve ısı kazancı gelirler, yıllık amortisman, yakıt, bakım ve işletme harcamaları ise giderler hanesinde değerlendirilir. Üretilen toplam elektriğin, aynı miktarda elektrik gücünün şebekeden alınması durumunda harcanacak para kadar kazanç sağlayacağı aşîkardır. Eğer yıllık elektrik ihtiyacından daha fazlasını üretecek kapasitede bir tesis kurulması planlanıyorsa, bu durumda fazla olan miktarın şebekeye satılmasından kaynaklanan kazancı da elektrik kazancına ilave etmek gerekir. Ancak, bu şekilde elektrik gelirinde meydana gelecek artışın, kapasite fazlalığının neden olacağı ilk yatırım ve işletme giderlerindeki artışı ne kadar karşılayacağı, tesisin amortismanı konusunda herhangi bir olumsuzluğa yol açıp açmayacağının etüdü gerekli olur.

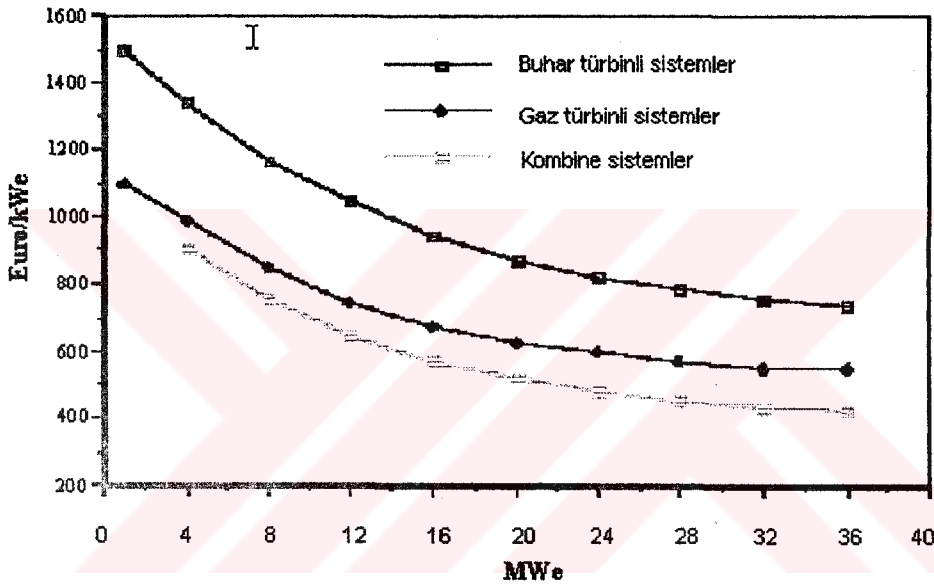
Sistemde üretilen faydalı ısı enerjisi de önemli miktarlarda ekonomik kazanç sağlar. Genel olarak ısı enerjisi temininde kullanılan fosil yakıtlar elektriğe göre oldukça ucuzdur. Bu durum kaçınılmaz olarak daha pahalı olan elektrik enerjisini ve bunun sağlayacağı kazancı önene çıkarmaktadır. Bununla beraber Isıl güç ihtiyacının fazla olduğu durumlarda, özellikle Güç/Isı oranı 1 (bir)'den küçük olması durumunda ısı kazancı çok önem kazanır. Üretilen toplam ısı enerjisinin, aynı miktarda ısıl güç elde etmek amacıyla üretmek için yapılacak harcama kadar kazanç sağladığı düşünülerek hesaplanır.

Kojenerasyon sistemlerinin ilk yatırım maliyetleri sistemin tipine ve istenen kapasiteye bağlı olarak önemli değişiklikler gösterir (Şekil 3.3). Aynı kapasite değeri için, kombine bir sistemin yalnızca buhar türbini veya yalnızca gaz türbini ile kurulacak bir kojenerasyon tesisinden çok daha ucuz olduğu görülmektedir. Bu ise, kısa ve uzun vadede önemli bir fiyat

avantajı ortaya çıkarır. 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.

Sabit yıllık amortisman veya sabit yıllık sermaye maliyeti olarak adlandırılan bu yöntemde şimdiki değeri I (\$) olan bir yatırımın sabit yıllık amortisman bedeli şu şekilde hesaplanır;

$$C_K = I \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \text{ (\$/yıl)} \quad (3.30)$$



Şekil 3.3 Kojenerasyon sistemleri maliyet grafiği (EDUCOGEN,2001)

Formüldeki $[i(1+i)^n]/[(1+i)^n - 1]$ çarpanı “Yatırım İkame Faktörü” veya “Amortisman Katsayısı” olarak adlandırılmaktadır. i yıllık faiz oranını, n ise tesisin kullanım süresini (yıl) göstermektedir.

İşletme ve bakım masrafları işletme esnasındaki tüm işçilik, malzeme tedarik ve depolaması, tamir ve bakım, sigorta gibi harcamaları kapsar. Bu masrafları iki ana grupta toplamak mümkündür:

- Kullanma süresi veya şebeke yük faktörüne bağlı olmayan, yıllık sabit masraflar,
- Üretilen enerji ile orantılı yıllık değişken maliyetler.

Kojenerasyon sistemleri için birim güç başına yıllık işletme ve bakım maliyetleri Çizelge 3.1’

de verilmiştir. Tablodaki değerler kullanılarak yıllık toplam işletme ve bakım maliyetleri (C_m) bulunur.

Çizelge 3.1 Kojenerasyon sistemleri için birim işletme bakım maliyetleri
(EDUCOGEN,2001)

Sistem Tipi	İşletme ve bakım maliyeti ¹ (Euro/MWe)
Buhar türbinli	2,3 - 1,5
Gaz türbinli	5,4 - 4,6
Kombine	5,4 - 4,6
¹ Büyük kapasiteli sistemler için küçük olan değerler alınmalıdır.	

C_f yıllık yakıt maliyeti,

$$C_f = m_f \cdot F \quad (3.31)$$

şeklinde hesaplanır. Burada m_f yıllık yakıt tüketimi ve F yakıtın birim fiyatıdır.

$$m_f = 3600 \frac{\dot{Q}_v}{H_u \eta_b} Y\dot{C}S \quad (\text{kg/yıl}) \quad (3.32)$$

ile hesaplanır. Formüldeki H_u kullanılan yakıtın alt ısı değeri (kJ/kg), $Y\dot{C}S$ yıllık çalışma saati ve η_b yanma verimidir.

Elektrik geliri yıllık çalışma süresi ve formül (3.23) ile bulunan toplam güç değerine bağlı olarak aşağıda verilmiştir:

$$EG = c_e Y\dot{C}S \eta_G \dot{W}_T \quad (\$/\text{yıl}) \quad (3.33)$$

Buhar geliri ise $\dot{Q}_p$ proses ısı değeri ve yıllık çalışma süresine göre aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$BG = \dot{Q}_p Y\dot{C}S \cdot F \quad (\$/\text{yıl}) \quad (3.34)$$

Yukarıda verilen formüllere göre toplam gelir ve giderler aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\text{Toplam Gelir} = EG + BG \quad (3.35)$$

$$\text{Toplam Gider} = C_k + C_m + C_f \quad (3.36)$$

$$\text{Yıllık Kazanç} = \text{Toplam Gelir} - \text{Toplam Gider} \quad (3.37)$$

Buraya kadar verilen formüller ile kojenerasyon sisteminin yıllık toplam gelir ve giderleri belirlenmiştir. Geri ödeme süresi ise yatırımın toplam bedelinin kazanç değerine bölünmesiyle bulunur.

$$\text{Geri Ödeme Süresi (GÖS)} = \text{Yatırımın toplam bedeli} / \text{Yıllık Kazanç} \quad (3.38)$$

3.3 Sayısal Örnek

$T_A=300$ K ve $T_C=1300$ K sıcaklıkları arasında çalışan ideal bir gaz türbini için sayısal bir örnek aşağıda verilmiştir. Gaz türbinin net gücü 4MW ve adyabatik sıcaklıklar oranı $\theta=1,5$ kabul edelim. Buna göre gaz türbini termik verimi ($\eta_{th,GT}$), B ve D hal noktalarının sıcaklıkları şu şekilde hesaplanır:

$$\eta_{th,gt} = 1 - \frac{1}{\theta} = 1 - \frac{1}{1,5} = 0,333 \quad (\text{denklem 3.11})$$

$$T_B = \theta \cdot T_A = 1,5 \cdot 300 \quad (\text{denklem 3.6})$$

$$T_B = 450 \text{ K } (177^\circ\text{C})$$

$$\frac{T_C}{T_D} = \theta \quad (\text{denklem 3.6})$$

$$T_D = 1300/1,5 = 867 \text{ K } (594^\circ\text{C})$$

$$\frac{T_C}{T_A} = \alpha$$

$$\alpha = 1300/300 = 4,333$$

Denklem 3. 9 kullanılarak gaz türbini çevrimine ait iş akışkanı kütleli debisi ise;

$$\dot{W}_{gt} = \dot{m}_g c_p T_A \left[\alpha \left(1 - \frac{1}{\theta} \right) - (\theta - 1) \right]$$

$$\dot{m}_g = \frac{4000}{1,005 \cdot 300 \left[4,333 \left(1 - \frac{1}{1,5} \right) - (1,5 - 1) \right]}$$

$$\dot{m}_g = 14,0475 \text{ kg/s}$$

olarak bulunur. Ayrıca, yanma odasında çevrime verilen ısı, atık ısı kazanında akışkandan çekilen ısı ve çevreye atılan ısı miktarları da ilgili formüller yardımıyla hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_v = \dot{m}_g c_p (T_C - T_B) = 14,0475 \cdot 1,005 (1300 - 450) \quad (\text{denklem 3.1})$$

$$\dot{Q}_v = 12000 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{DE} = \dot{m}_g c_p (T_D - T_E) = 14,0475.1,005(867-450) \text{ (denklem 3.2)}$$

$$\dot{Q}_{DE} = 5887,1 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{EA} = \dot{m}_g c_p (T_E - T_A) = 14,0475.1,005(450-300) \text{ (denklem 3.3)}$$

$$\dot{Q}_{EA} = 2117,7 \text{ kW}$$

$T_D=1300 \text{ K}$ sıcaklığında gaz türbinini terk eden egzoz gazlarının enerjisi bir atık ısı kazanında değerlendirilerek 500°C sıcaklıkta ve 7MPa basınçta buhar üretiliyor olsun. Atık gazların sıcaklığı (T_E) 177°C , ara buhar alma oranı (y) 0.3 , çekilen ara buhar basıncı 500KPa , ve pompa işlerinin ihmal edildiği kabulleriyle karışım odası çıkışında akışkanın entalpisi ve buna bağlı olarak elde edilecek buharın kütleli debisi şu şekilde hesaplanır:

$$h_1 = y h_6 + (1-y) h_8 \text{ (denklem 3.15)}$$

$h_6 = h_5$, $h_7 = h_8$ pompa işleri ihmal edilebilir.

$$h_5 = h_f, 500\text{kPa} = 640,23 \text{ kJ/kg} \quad (151,86^\circ\text{C}, 424,86\text{K})$$

$$h_7 = h_f, 5\text{kPa} = 137,82 \text{ kJ/kg} \quad (32,88^\circ\text{C}, 305,88\text{K})$$

$$y=0,3 \rightarrow h_1 = 0,3.640,23 + 0,7.137,82 = 288,543$$

$$h_2 = 3410,3 \text{ kJ/kg} \quad (7\text{MPa}, 500^\circ\text{C}, 773\text{K}) \text{ (kızgın buhar tablosundan)}$$

h_5 ve h_7 entalpileri sırasıyla 500 KPa ve 5 KPa (kondenser basıncı) basınç değerlerindeki doymuş su için tablolardan okunabilir.

$$\dot{m}_b (h_2 - h_1) = \dot{m}_g c_p (T_D - T_E)$$

$$\dot{m}_b = \dot{m}_g c_p \frac{(T_D - T_E)}{(h_2 - h_1)}$$

$$\dot{m}_b = 14,0475.1,005 \frac{(867 - 450)}{(3410,3 - h_1)} \quad y=0,3 \rightarrow \dot{m}_b = 1,88 \text{ kg/s}$$

Bulunan buhar debisi yardımıyla da proses için çekilen ısı miktarı, ara buhar alma işlemi öncesinde ve sonrasında buhar türbininden alınan W_{bt1} ve W_{bt2} işleri hesaplanır. h_3 ve h_4 entalpileri 3 ve 4 numaralı hal noktalarındaki kuruluk oranları ve entropi değerlerine bağlı olarak bulunmaktadır.

$$\dot{Q}_p = y \dot{m}_b (h_3 - h_5) \text{ (denklem 3.19)}$$

$$h_3 = 2738,2 \text{ kJ/kg} \quad (x=0,995)$$

$$y=0,3 \rightarrow \dot{Q}_p = 0,3.1,88(2738,2 - 640,23) = 1183,25 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{bt1} = \dot{m}_b(h_2 - h_3) \quad (\text{denklem 3.18})$$

$$y=0,3 \rightarrow \dot{W}_{bt1}=1,88(3410,3-2738,2)=1263,55 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{bt2} = (1-y)\dot{m}_b(h_3 - h_4) \quad (\text{denklem 3.20})$$

$$h_4=2071,9 \quad (x=0,798) \text{ kJ/kg}$$

$$y=0,3 \rightarrow \dot{W}_{bt2}=(1-0,3).1,88.(2738,2-2071,9)=876,85 \text{ kW}$$

Buhar türbinden alınan net iş, kojenerasyon tesisinde üretilen toplam net iş, sistemin ekserji verimi, enerji yararlanma oranı ve yapay termik verim değerleri ise şu şekilde bulunmaktadır:

$$\dot{W}_{bt}=\dot{W}_{bt1}+\dot{W}_{bt2}=1263,55+876,85 \quad (\text{denklem 3.21})$$

$$\dot{W}_{bt}=2140,4 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_T=\dot{W}_g+\dot{W}_{bt}=4000+2140,4 \quad (\text{denklem 3.23})$$

$$\dot{W}_T=6140,4 \text{ kW}$$

$$\dot{E}_{Qp} = y\dot{m}_b(h_3 - h_4) = 0,3.1,88(2738,2 - 2071,9)=375,79 \text{ kW} \quad (\text{denklem 3.25})$$

$$\dot{E}_{Qv} = \dot{Q}_v \left(1 - \frac{T_A}{T_C} \right) = 12000 \left(1 - \frac{300}{1300} \right) = 9230 \text{ kW} \quad (\text{denklem 3.27})$$

$$\dot{E}_T = \dot{W}_T + \dot{E}_{Qp} = 6140,4 + 375,79 = 6516,19 \text{ kW} \quad (\text{denklem 3.24})$$

$$\eta_E = \frac{\dot{E}_T}{\dot{E}_{Qv}} = \frac{6516,19}{9230} = 0,706 \quad (\text{denklem 3.26})$$

$$EYO = \frac{\dot{W}_T + \dot{Q}_p}{\dot{Q}_v} = \frac{6140,4 + 1183,25}{12000} = 0,610 \quad (\text{denklem 3.28})$$

$$\eta_Y = \frac{\dot{W}_T}{\dot{Q}_v - \dot{Q}_p} = \frac{6140,4}{12000 - 1183,25} = 0,567 \quad (\text{denklem 3.29})$$

Şekil 3.3 yardımıyla bu tesisin bugünkü değeri (I) şöyle bulunmaktadır:

$$I=825.6140,4.0,9=4.559.247 \$$$

Yıllık faiz oranı (i) %3, tesisin kullanım süresi (n) 20 yıl alınırsa amortisman katsayısına bağlı olarak yıllık sabit sermaye maliyeti (C_K) şu şekilde hesaplanır:

$$C_K = I \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (\text{denklem 3.30})$$

$$C_K=0,06722.4559247$$

$$C_K=306.473 \$/\text{yıl}$$

Çizelge 3.1 yardımıyla tesisin yıllık işletme ve bakım maliyeti (C_M) bulunur.

$$C_M = 5,4.6140,4.6000 = 198.936 \text{ \$/yıl}$$

Yıllık yakıt tüketimi (C_f) ise;

$$m_f = 3600 \frac{\dot{Q}_v}{H_u \eta_b} Y\dot{C}S = 3600 \frac{12000}{48000.0,93} 6000 = 5.806.451 \text{ kg/yıl (denklem 3.32)}$$

$$C_f = m_f \cdot F = 5806451.0,225 = 1.306.451 \text{ \$/yıl (denklem 3.31)}$$

olarak bulunur. Burada yakıt alt ısı değeri $H_u = 48000 \text{ kJ/kg}$ (doğalgaz), η_b yanma verimi %93, yıllık çalışma süresi 6000 saat ve yakıt fiyatı 0,225 $\text{\$/kg}$ alınmıştır.

c_e elektrik enerjisi temin fiyatı 0,09 $\text{\$/kWh}$, η_G jeneratör verimi 0,9 kabul edilerek sistemin elektrik ve buhar gelirleri bulunur:

$$EG = c_e Y\dot{C}S \eta_G \dot{W}_T \text{ (denklem 3.33)}$$

$$EG = 0,09.6000.0,9.6140,4 = 2.984.234 \text{ \$/yıl}$$

$$BG = \dot{Q}_p Y\dot{C}S.F \text{ (denklem 3.34)}$$

$$BG = 0,025.6000.1183,25 = 177.487,5 \text{ \$/yıl}$$

Denklem 3.35 ile toplam gelir, denklem 3.36 ile toplam gider, denklem 3.37 ile yıllık kazanç ve denklem 3.38 ile de tesisin kendini geri ödeme süresi değerleri hesaplanır:

$$\text{Toplam Gelir} = EG + BG$$

$$\text{Toplam Gelir} = 2984234 + 177487,5 = 3.161.721,5 \text{ \$/yıl}$$

$$\text{Toplam Gider} = C_k + C_m + C_f$$

$$\text{Toplam Gider} = 306.473 + 198.936 + 1.306.451 = 1.811.860 \text{ \$/yıl}$$

$$\text{Yıllık Kazanç} = \text{Toplam Gelir} - \text{Toplam Gider}$$

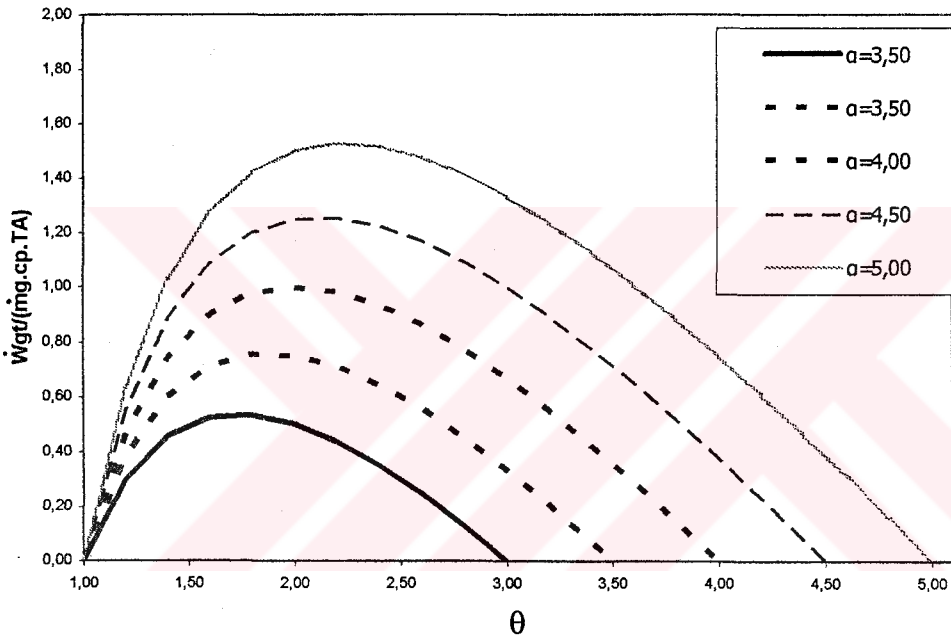
$$\text{Yıllık Kazanç} = 3161721,5 - 1811860 = 1.349.861,5$$

$$\text{Geri Ödeme Süresi (GÖS)} = \text{Yatırımın toplam bedeli} / \text{Yıllık Kazanç}$$

$$\text{Geri Ödeme Süresi (GÖS)} = 4.559.247 / 1.349.861,5 = 3,377 \text{ yıl}$$

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Şekil 4.1’de $\dot{W}_g/\dot{m}_g \cdot c_{pg} \cdot T_A$ boyutsuz güç değerinin θ (adyabatik sıcaklıklar oranı) ile değişimi verilmiştir. $\theta=T_B/T_A$ oranı arttıkça gaz türbininden elde edilen güç değeri de artmakta ancak, belirli bir θ değerinden sonra düşmektedir. Gücün maksimum olduğu θ değerleri gaz türbininin ekstrem sıcaklıklar oranı ($\alpha=T_C/T_A$) değerine bağlı olarak artmaktadır ($\alpha=3,5$ için $\theta \approx 1,6$; $\alpha=4,5$ için $\theta \approx 2$). θ arttıkça türbinin geri besleme oranı (kompresörü çalıştırmak için harcanan güç) artmakta ve gaz türbininden elde edilen net güç azalmaktadır.

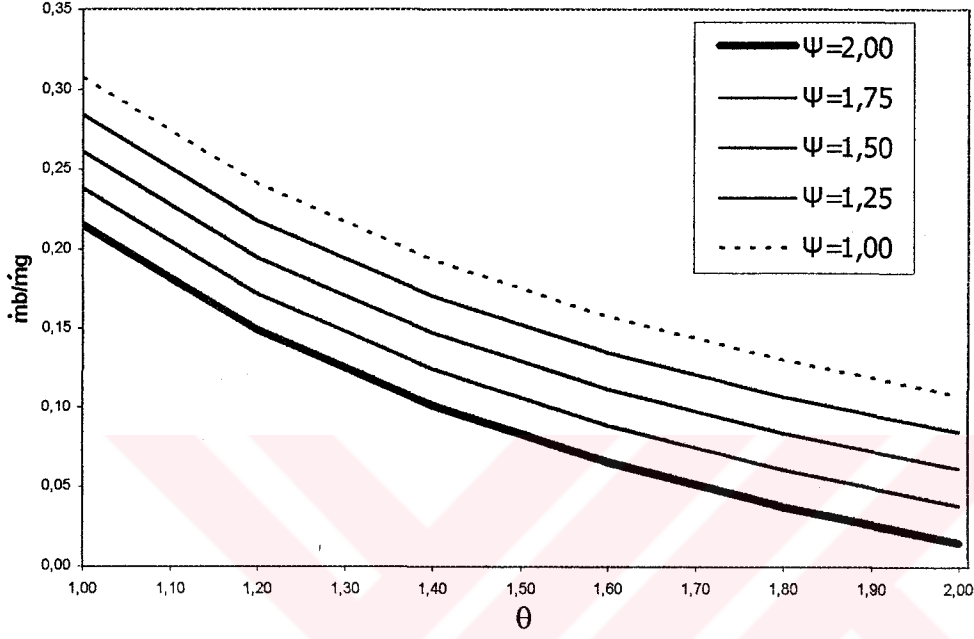


Şekil 4.1 $\dot{W}_g/\dot{m}_g \cdot c_{pg} \cdot T_A - \theta$ değişimi

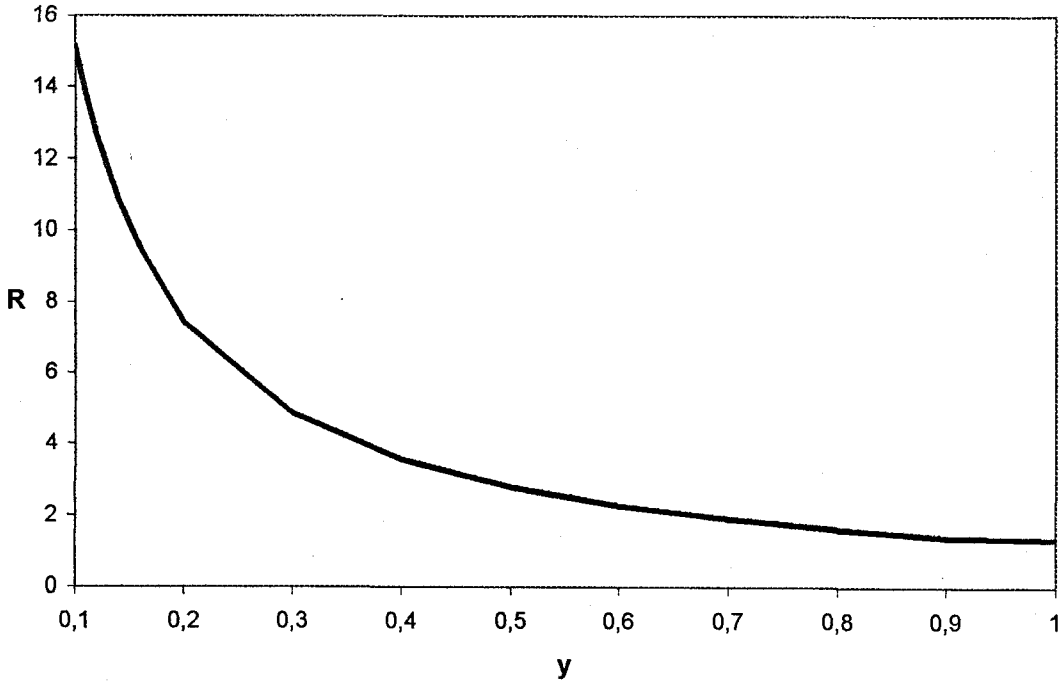
Şekil 4.2’de θ ile $\dot{m}_b/\dot{m}_g$ oranının değişimi görülmektedir. Atık gazların sıcaklığı düştükçe kazanılan ısı miktarı ve elde edilen buhar miktarı da artmaktadır. Aynı Ψ değeri için θ arttıkça $\dot{m}_b/\dot{m}_g$ oranının düştüğü görülmektedir. Sabit $\dot{m}_b/\dot{m}_g$ değeri için $\Psi=T_E/T_A$ düştükçe θ değeri artmalıdır.

Güç/Isı oranı ($R=\dot{W}_T/\dot{Q}_P$) ile çekilen buhar miktarı ($y=\dot{m}_3/\dot{m}_b$) arasındaki ilişki Şekil 4.3’ de görülmektedir. Çekilen buhar miktarı arttıkça R önce azalmaktadır. $y=0,4$ mertebesinde itibaren azalma daha az olmaktadır ($R \approx 4$). R ’nin 1 (bir)’den büyük kalmasının en önemli nedeni buhar üretimi için yalnızca yüksek sıcaklıktaki gaz türbini egzoz gazlarının ısısından

yararlanılmasıdır. Daha düşük R değerleri için ek yanma yapılarak üretilen buhar miktarı artırılmalıdır.

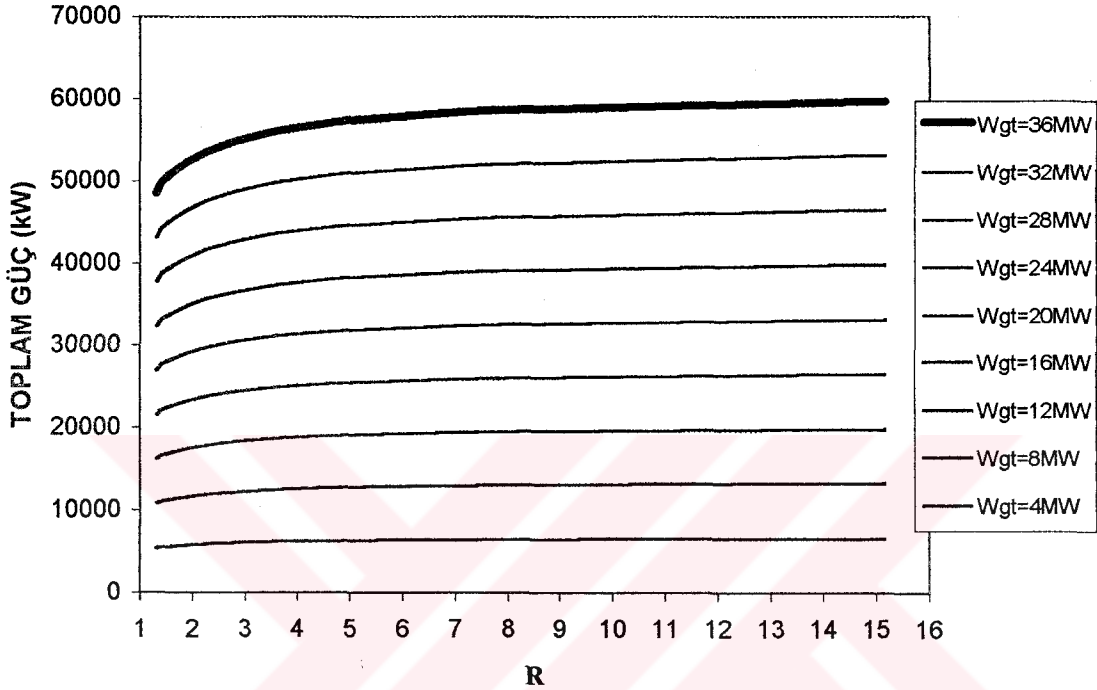


Şekil 4.2 $\dot{m}_b/\dot{m}_g - \theta$ değişimi



Şekil 4.3 Çekilen buhar oranı ile Güç/Isı oranının değişimi

Şekil 4.4'te toplam güç değerinin Güç/Isı oranıyla değişimi verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi Güç/Isı oranı (R) arttıkça (dolayısıyla y azaldıkça) sistemden alınan iş de artmaktadır. $R \approx 4$ mertebesine kadar artış hızlı olmakta, daha büyük R değerleri için artış yavaşlamaktadır. Isı ihtiyacının düşük olduğu durumlar için R değerinin 4-6 aralığında seçilmesi elektrik üretimini ve dolayısıyla elektrik gelirini arttıracaktır.



Şekil 4.4 Güç/Isı oranı ile toplam gücün değişimi

Şekil 4.5'te R arttıkça toplam ekserji değerinin çok az değiştiği görülmektedir. Ayrılan buhar miktarı azaldıkça proses ısısı değeri düşmekte fakat buna karşılık olarak buhar türbininden alınan iş artmaktadır. $R \approx 4$ 'e kadar toplam güç hızı artmakta, kazanılan ısı miktarı ise hızla yavaşlamaktadır. Daha büyük değerlerde değişim daha az olmakla birlikte devam etmektedir. Üretilen ya da proses için çekilen buharın düşük değerleri için sistem tek başına çalışan ve mekanik güç üreten konvansiyonel sistemlere benzemekte ve egzoz gazlarının enerjisinden daha az yararlanılmaktadır. Güç/Isı oranı büyüdükçe kazanılan ısı miktarında da beklenen düşmeler olmaktadır.

Şekil 4.6'de ekserji verimi, enerji yararlanma oranı ve yapay termik verim değerlerinin Güç/Isı oranı ile değişimleri verilmiştir. R büyüdükçe enerjiden yararlanma oranında hızlı bir azalma görülür. Bunun nedeni; çekilen buhar miktarının ve dolayısıyla proses ısısı değerinin azalmasıdır.

Koçak, T. Ve Gülşen, O., (1998), "Bölgesel ısıtma ve Kojenerasyon", Bölgesel ısıtma ve Kojenerasyon Konferansı, 24-25 Ekim, 1998, İstanbul.

Koşar, M., (1995), Doğalgazlı Bileşik Elektrik Isı Üretim Sistemi Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü (yayımlanmamış).

Külçe, N. ve Topuz, G., (1996), "Kojenerasyon Sistem seçimi ve Türkiye Örneği", 2.Uluslararası Birleşik Isı ve Güç Üretimi Konferansı, 20-21 Haziran 1996, İstanbul, 65-67

Lucas, K., (2001), "Efficient energy systems on the basis of cogeneration and heat pump technology", Int. J. Therm. Sci., 40: 338-343

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

Mendilcioğlu, M., (1998), "Otoprodüktörlük Uygulamaları", 4.Uluslararası Kojenerasyon ve Çevre Konferansı, 28-29 Nisan 1998, Ankara, 21-23.

Najjar, Y.S., Lamfon, N.J., Akyurt, M., (1994), "Modeling and Simulation of Gas Turbine Engines at Different Loading Conditions", Mechanical Engineering Department, King Abdulaziz University

Silveria, J. L., Beyene, A., Leal, E. M., Santana, J. A., Okada, D., (2002), "Thermoeconomic analysis of a cogeneration system of a university campus", Applied Thermal Engineering, 22:1471-1483

Spakovsky, M.R., Evans, V.B., (1990), "The Design and Performance Optimization of Thermal Systems", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 112.

Sucuoğlu, S., (1999), Kojenerasyonun İklim Bölgelerine Göre Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü (yayımlanmamış).

Şahin, B., Kodal, A., Ekmekçi, İ. ve Yılmaz, T., (1997), "Exergy Optimization for An Endoreversible Cogeneration Cycle", Energy, 22: 551-557.

Şahin, B. ve Kodal, A., (1999), Finite-Time Thermodynamics Approach for Exergy Optimization of An Irreversible Cogeneration Cycle. In Recent Advances in Finite- Time Thermodynamics, Eds. Wu, C., Chen, L., Chen, J., Nova Science Publishers, New York, 289-298.

Tuma, M., Oman, J., Sekavcnik, M., (1998), "Efficiency of a gas-steam process", Energy Conversion & Management, 40: 1163-1175

Üst, Y., (2001) Kombine Isı ve Güç sistemlerinin Performans ve Ekolojik Yönden Etüdü, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü (yayımlanmamış).

Wilkinson, B.W. ve Barnes, R.W., (1993), Cogeneration of Electricity and Useful Heat, Crc. Press, Florida.

Yang, O., Shimada, T., Tanishita, K., Sato, (1971), "A Study on the Total Energy System of the Gas Turbine", Bulletin of The Japanesse Society of Mechanical Engineers, 19

Yan, Z., (1993), "Comment on An Ecological Optimization Criterion for Finite- Time Heat Engines", Journal of Applied Physics, 73: 3583.

Yılmaz, T., (1997), "Isı Geri Kazanım Sistemleri" , III.Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, 20-23 Kasım 1997, İzmir, 109-133



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 20.08.1973

Doğum yeri Muş

Lise 1987-1990 Pendik Lisesi

Lisans 1990-1996 Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi
Gemi İnşaatı Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı kurumlar

1997 – 1998

1998 – Devam ediyor

Gürdesan Gemi Mak. San. ve Tic. Ltd. Şti.
İGDAŞ İstanbul Gaz Dağıtım San. ve Tic.A.Ş.

