

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLEŞİK ISI GÜÇ SİSTEMLERİ ve MATEMATİKSEL  
MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk. Müh. Mehlika ŞENGÜL

Ana Bilim Dalı: Elektrik  
Danışman: Prof. Dr. Nesrin TARKAN

HAZİRAN 2000

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLEŞİK ISI GÜÇ SİSTEMLERİ ve MATEMATİKSEL  
MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk. Müh. Mehlika ŞENGÜL

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23 Haziran 2000

Tezin Savunulduğu Tarih : 31 Temmuz 2000

Tez Danışmanı

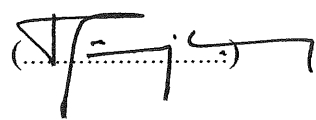
Üye

Üye

Prof. Dr. Nesrin TARKAN

Prof. Dr. Semra ÖZTÜRK

Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR



HAZİRAN 2000

# BİLEŞİK ISI GÜÇ SİSTEMLERİ ve MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Mehlika ŞENGÜL

**Anahtar Kelimeler:**Bileşik Isı-Güç, Kojenerasyon, Matematiksel Model, Simülasyon

**Özet:** Enerji konusunda önemli sorunların olduğu, günümüz teknolojisi ile bu sorunu çözecek bir enerji biçimi bulunamadığı için şu an kullanımdaki birincil enerji kaynaklarından yüksek verim elde edilmesi gerekir. Klasik sistemlerde, ihtiyaç duyulan elektrik enerjisi elektrik şebekesinden, ısı enerjisi ise buhar kazanından elde edilir. Kojenerasyon santrallerinde ise tek enerji kaynağı kullanılarak mekaniksel güç ve ısı enerjisi bir arada üretilir.

Ayrıca klasik sistemler oluşabilecek enerji kesintilerinden etkilenebilir. Özellikle imalat endüstrileri için kesintisiz enerji ve proses buharı büyük bir öneme sahiptir. Kısa süreli enerji kesintileri bile kimya, kağıt, metalurji, gıda ve maya üzerine çalışan firmalar için çok önemli büyük ekonomik kayıplara yol açabilir. Halbuki bileşik ısı-güç üretim sistemleri şebeke ile uyumlu çalışarak enerji kesintilerinden etkilenme oranını en aza indirir.

Bu tezde, verimli enerji üretmek için geliştirilmiş sistemler olan elektrik ve ısıyı aynı sistemde üreten bileşik ısı-güç üretim sistemlerinin çalışmaları incelenmiştir. Ayrıca ele alınan örnek bir sistemin matematiksel modeli oluşturularak simülasyonu yapılmış ve elektrik üretimi kontrolü hakkında çalışma yapılmıştır.

# COMBINED HEAT - POWER SYSTEMS and MATHEMATICAL MODELLING

Mehlika ŞENGÜL

**Keywords:** Combined Heat and Power , Cogeneration, Mathematical Modelling, Simulation

**Abstract:** In order not to be found any kind of energy to solve the problems about energy by the recent technology which has important high efficiency has to be obtained by the primer energy resources in use. In classical systems, electrical energy reuired is got from power grids and heat energy is from steam boiler. The cogeneration which is defined as combined production of heat and power is an combined production of mechanical powerand heat energy in the same central over a single energy source.

Besides this, classical systems could be effected by possible energy interruption. Especially for the manufacturing industry, an uninterrupted supply of power, proses steam and cooling is of existential importance. Even short-term outages can couse major economic losses for companies in the chamicals, paper, metallurgical, food and brewing industries. However, operating combined heat and power production systems computed with grids, ratio effected by power interruption is reduced minimum.

In this thesis, operating of combined heat and power generating systems which produce electricity and heat that is developed for transferring efficient energy at the same system are discussed. Generated electricity control is examined by acquiring mathematical model of a selected system.

## **ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR**

Bileşik Isı- Güç Üretim Sistemleri'nin incelenmesi ve daha verimli kullanılması için kontrol yöntemlerinden faydalanılması gerektiğini gösteren bu tezde, çalışmamı yönlendiren ve destek sağlayan sayın, Prof. Dr. Nesrin TARKAN'a, yardımlarından dolayı Arş.Gör. Tarık ERFİDAN'a ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
TABLolar DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. BİR GÜÇ SANTRALİNİ OLUŞTURAN ELEMANLAR.....	5
2.1. Buhar Üretim Tesisi(Kazan) .....	5
2.2. Isı İşlemlerindeki Ek Elemanlar.....	6
2.2.1. Atık ısı kazanı.....	6
2.2.2. Süper ısıtıcı(Süperheater) .....	7
2.2.3. Tekrar ısıtıcı(Reheater) .....	7
2.2.4. Ekonomizer.....	7
2.2.5. Hava ön ısıtıcısı.....	7
2.2.6. İlave ateşlemeli atık ısı kazanı.....	8
2.3. Kompresör.....	9
2.4. Yanma Odası(Reaktör).....	9
2.5. Türbinler.....	10
2.5.1. Gaz türbini.....	10
2.5.2. Buhar türbini.....	11
2.6. Yoğuşturucu(Kondenser) .....	12
BÖLÜM 3. ENERJİ ÜRETİM SİSTEMLERİNİN İŞLETİLMESİ.....	14
3.1. Tek Boyutlu Sistemlerde Verim Yükseltme Yöntemleri.....	15
3.1.1. Baca gazından yararlanmak.....	15
3.1.2. Türbinlerin çok kademeli yapılması.....	16
3.1.3. Karşı basınçlı çok kademeli türbin kullanılması.....	17

3.2. Tek Boyutlu Sistemlerden Bileşik-Isı Güç Üretim Sistemine Geçiş.....	20
3.3. Atılan Isının Yararlı Kullanılış Alanları.....	25
3.4. Sistemin Verimi.....	26
<b>BÖLÜM 4. BİLEŞİK ISI-GÜÇ ÜRETİM TÜRLERİ.....</b>	<b>30</b>
4.1. Alt ve Üst Çevrimli Türler.....	30
4.1.1. Üst çevrimli türler.....	30
4.1.2. Alt çevrimli türler.....	31
4.2. Buhar Türbinli Sistemler.....	31
4.2.1. Karşı basınç türbinli bileşik ısı-güç üretim sistemi (Kondensersiz çevrim) .....	32
4.2.2. Yoğuşma/Ekstraksiyon türbinli (Ara buhar çekilen) bileşik ısı-güç üretim sistemi(Kodenserli çevrim) .....	33
4.3. Gaz Türbinli Sistemler.....	35
4.3.1. Çevrim açısından gaz türbinli sistemler.....	37
4.3.1.1. Açık çevrimli sistemler.....	37
4.3.1.2. Kapalı çevrimli sistemler.....	37
4.3.2. Atık ısı kazanı kullanılan türleri.....	39
4.3.2.1. Ateşlemesiz atık ısı kazanlı sistemler.....	39
4.3.2.2. İlave ateşlemeli atık ısı kazanlı sistemler.....	40
4.3.3. Buhar enjeksiyonlu gaz türbini.....	40
4.3.4. Gaz türbinli çevrimde buhar türbini kullanımı.....	41
4.3.5. Egzos gazlarının doğrudan kullanıldığı gaz türbinli sistemler.....	42
4.4. İçten Yanmalı Motorlu Sistemler.....	43
4.4.1. Gaz motorlu sistemler.....	43
4.4.2. Dizel motorlu sistemler.....	45
4.4.3. İçten yanmalı motorlu santrallerin elektrik düzenleri.....	46
4.4.3.1. Otomatik yolalama düzenleri.....	46
4.4.3.2. Senkronizasyon düzenleri.....	47
4.5. Kombine Çevrimli Sistemler.....	50
4.5.1. Karşı basınçlı türbin ile kombine çevrim.....	51
4.5.2. Yoğuşma/Ekstraksiyon türbini ile kombine çevrim.....	52

4.5.3. Alçak ve yüksek basınç kademeli atık ısı kazanı kullanımı.....	53
4.6. Nükleer Yakıtlı Bileşik Isı-Güç Üretim Sistemi.....	54
<b>BÖLÜM 5. BİLEŞİK ISI-GÜÇ ÜRETİM SİSTEMLERİNDE OPTİMUM SİSTEM</b>	
<b>KAPASİTESİ ve TÜRÜNÜN SAPTANMASI.....</b>	
5.1. Enerji Üretiminde Seçenekler.....	56
5.2. Örnek.....	69
<b>BÖLÜM 6. TÜRKİYE'DE KURULAN BİLEŞİK ISI-GÜÇ ÜRETİM</b>	
<b>SANTRALLERİNİN ÖNEMİ ve ÇEVREYE ETKİLERİ.....</b>	
6.1. Türkiye'de Enerji Kaynakları ve Kojenerasyon.....	78
6.2. İleriye Dönük Market Araştırması.....	80
6.3. Bileşik Isı Güç Sistemlerinin Çevre Korumaya Katkısı.....	81
6.3.1. Fosil yakıtlı santrallerden kaynaklanan çevre sorunları.....	81
6.3.2. Temiz enerji üretim sistemleri ve yeni teknolojiler.....	83
6.3.2.1. Linyitlerin değerlendirilmesi için teknolojiler.....	83
6.3.2.1.1. Toz tutma ve baca gazı arıtma teknolojileri.....	83
6.3.2.1.2. Akışkan yatakla yakma teknolojisi.....	83
6.3.2.1.3. Entegre kömür gazlaştırma kombine çevrim teknolojisi.....	84
6.3.2.2. Doğal gaz ve sıvı yakıt kullanılan enerji üretim teknolojileri.....	84
6.3.2.2.1. Kombine çevrim santralleri.....	85
6.3.2.2.2. Bileşik ısı-güç üretim sistemleri.....	86
<b>BÖLÜM 7. ELE ALINAN ÖRNEK TESİSİN MODELİNİN OLUŞTURULMASI</b>	
<b>ve SİMÜLASYONU.....</b>	
7.1. Tesisin Tanımı.....	87
7.2. Tesisin Modellenmesine İlişkin Çalışma.....	89
7.3. S Domeninde Matematiksel Modeli Oluşturulan Tesisin Elektrik Üretim Kontrolü.....	95



SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	106
KAYNAKLAR.....	108
EKLER.....	110
EK A. ....	110
EK B. ....	124
ÖZGEÇMİŞ.....	134

## SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR

- a : Birim tesis maliyeti
- $a_B$  : Buhar türbinli sistemin birim tesis maliyeti
- $a_G$  : Gaz türbinli sistemde birim tesis masrafı
- A : Tesisin yıllık elektrik enerjisi maliyeti
- $A_B$  : Buhar türbinli sistemde şebekeden alınan yıllık elektrik enerjisi maliyeti
- $A_G$  : Gaz türbinli sistemde şebekeden elektrik enerjisinin alım fiyatı
- $A_K$  : Kombine çevrimli sistemde elektrik enerjisinin şebekeden alım masrafı
- b : Buhar kazanının yıllık bakım masrafı
- $b_B$  : Buhar türbinli sistemin yıllık bakım masrafı
- $b_G$  : Gaz türbinli sistemde yıllık birim bakım masrafı
- c : Ayrı ayrı enerji üretiminde yıllık toplam maliyet
- $C_B$  : Buhar türbinli sistemde işletme ve bakım masrafı dahil yıllık üretim masrafı
- $C_G$  : Gaz türbinli sistemde yıllık üretim masrafı
- $C_K$  : Kombine çevrimli sistemde işletme ve bakımı da içeren yıllık toplam üretim masrafı
- d : Gaz türbininde 1 kW'lık elektriksel güç üretmek için gerekli olan yakıt miktarı
- e : Toplam enerji çıkışının elektriğe olan kısmı
- E : Üretilen elektrik enerjisi
- f : Elektrik enerjisi satan kuruluşun enerji birim satış fiyatı
- g : Elektriğin şebekeye satışındaki birim fiyat
- $h_ç$  : Türbinden çıkıp kondensere giren buharın entalpisi
- $h_d$  : Tesiste işlemde geçtikten sonra çevrime geri dönen su, buhar entalpisi(kj/kg)
- $h_g$  : Tesiste ihtiyaç duyulan buhar entalpisi(kj/kg)
- $h_T$  : Kazandan çıkıp türbine giren buharın entalpisi
- I : Yıllık işletme ve bakım maliyeti
- i : Buhar kazanının yıllık birim işletme masrafı
- $I_B$  : Buhar türbinli sistemin yıllık birim işletme masrafı
- $I_G$  : Gaz türbinli sistemde yıllık birim işletme masrafı

- j : Zaman diliminin numarası
- k : Tesisin bir yıl boyunca işletmede kaldığı gün sayısı
- $K_G$  : Gaz türbinli sistemde atık ısı kazanında kullanılan ek yakıtın masrafı
- $K_K$  : Kombine çevrimli sistemde atık ısı kazanında kullanılan yakıt masrafı
- $m_j$  : Tesisin j. dilimindeki buhar gereksinimi (ton/saat)
- mtoe : Milyon ton eşdeğer petrol
- $m_{Xj}$  : j. Dilimde, kazanın düşük basınçlı bölümünden çıkan buharın debisi
- $m_{Zj}$  : j. Dilimde, kazanın yüksek basınçlı bölümünden çıkan buharın debisi
- M : Buhar kazanının tesis maliyeti
- $M_B$  : Buhar türbinli sistemde tesis maliyeti
- $M_G$  : Gaz türbinli sistemde tesis maliyeti
- $M_K$  : Kombine çevrimli sistemde tesis maliyeti
- N : Bir gün içindeki zaman dilimlerinin sayısı
- $P_{Bj}$  : Buhar türbininin j. dilimde ürettiği elektriksel güç
- $P_{BTj}$  : Buhar türbininin j. dilimde ürettiği mekanik güç
- $P_d$  : Tesiste işlemden geçtikten sonra çevrime geri dönen su, buhar basıncı(bar)
- $P_g$  : Tesiste ihtiyaç duyulan buhar basıncı
- $P_{Gj}$  : Gaz türbini tarafından j. dilimde üretilen elektriksel güç
- $P_j$  : Tesisin j. dilimindeki elektrik gücü gereksinimi(kW)
- $P_{Kj}$  : Kombine çevrimli sistemde elde edilecek elektriksel güç
- Q : Sisteme giren yakıt ısı
- S : Gaz türbini çevriminin ısı-güç oranı
- $S_B$  : Buhar türbinli sistemde şebekeye elektrik satışından elde edilecek gelir
- $S_G$  : Gaz türbinli sistemde şebekeden elektrik enerjisinin alım fiyatı
- $S_K$  : Kombine çevrimli sistemde şebekeye elektrik enerjisi satışından elde edilecek gelir
- t : Bir zaman diliminin süresi
- $T_d$  : Tesiste işlemden geçtikten sonra çevrime geri dönen su, buhar sıcaklığı( $^{\circ}C$ )
- $T_g$  : Tesiste ihtiyaç duyulan buhar sıcaklığı( $^{\circ}C$ )
- y : Birim yakıt fiyatı
- Y : Ayrı ayrı enerji üretiminde buhar kazanının yıllık yakıt maliyeti
- $Y_B$  : Buhar türbinli sistemde yıllık yakıt masrafı
- $Y_{Bj}$  : Buhar türbinli sistemde j. dilimde gerekli olan yakıt miktarı

- $Y_G$  : Gaz türbinli sistemde kullanılan yakıtın masrafı  
 $Y_K$  : Kombine çevrimli sistemde gaz türbininde kullanılan yakıt masrafı  
 $\Delta h$  : Kazan tarafından buhara verilen birim enerji(kj/kg)  
 $\Delta H_s$  : Sisteme verilen ısı enerjisi  
 $\eta_A$  : Ayrı ayrı enerji üretiminde verim  
 $\eta_B$  : Bileşik ısı-güç üretiminin verimi  
 $\eta_e$  : Elektrik santrali verimi  
 $\eta_g$  : Generatör verimi  
 $\eta_k$  : Buhar kazanı verimi
- A.B.T. : Alçak Basınç Türbini  
A.I.K. : Atık Isı Kazanı  
B.B. : Buhar Basıncı  
B.I.G.Ü: Bileşik Isı-Güç Üretimi  
B.M. : Buhar Miktarı  
B.T. : Buhar Türbini  
C.H.P. : Bileşik Isı-Güç (Combined Heat and Power)  
Ç.B. : Çürük Buhar  
E.Ç.S. : Egzos Çıkış Sıcaklığı  
E.G.B. : Egzos Giriş Basıncı  
E.K. : Ekonomizer  
E.Ş. : Eşanjör  
E.Ü. : Elektrik Üretimi  
F.G.D. : Baca Gazı Arıtma Sistemi  
G. : Generatör  
G.T. : Gaz Türbini  
H.H.V. : Üst Isıl Değeri  
H.P. : Yüksek Basıncılı  
I.G.C.C: Entegre Kömür Gazlaştırma Kombine Çevrim Teknolojisi  
K. : Kondenser(Yoğuşturucu)  
K.P. : Kompresör  
K.Ç.B. : Kompresör Çıkış Basıncı  
K.Ç.S. : Kompresör Çıkış Sıcaklığı

- K.G.B. : Kompresör Giriş Basıncı  
K.Z. : Kazan  
L.P. : Alçak Basıncılı  
L.P.G. : Likid Petrol Gazı  
O.S :Ortam Sıcaklığı  
P. : Pompa  
S.H. : Süper Isıtıcı(Süper Heater)  
S.S. : Sıcak Su  
Y. : Yoğuşturucu(Kondenser)  
Y.B.K.B: Yüksek Basıncılı Kızgın Buhar  
Y.B.T. : Yüksek Basıncı Türbini  
Y.M. : Yakıt Miktarı  
Y.O. : Yanma Odası(Reaktör)  
Y.O.Ç.B:Yanma Odası Çıkış Basıncı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Buhar Kurutucu Tesisatı.....	6
Şekil 2.2. Atık Isı Kazanı.....	9
Şekil 2.3. Yanma Odası İçinde Hava Akışı.....	10
Şekil 2.4. Gaz Türbininin Çalışma Prensibi.....	11
Şekil 2.5. Yoğuşturucu Kapalı Çevrim Şeması.....	12
Şekil 2.6. Yoğuşturucu Açık Çevrim Şeması.....	13
Şekil 2.7. Açık Çevrimli Yoğuşturucuda Fıskiye Yöntemi.....	13
Şekil 3.1. Tek Boyutlu Sistemde Basit Çevrim.....	14
Şekil 3.2. Baca Gazından Yararlanış Biçimleri.....	16
Şekil 3.3. Çok Kademeli Türbin Kullanım Sistemi.....	17
Şekil 3.4. Karşı Basıncılı ve Çok Kademeli Türbin Sistemi.....	18
Şekil 3.5. Karşı Basıncılı Çok Kademeli Türbin Sisteminde Buhar Çıkışlı Eşanjör Kullanımı.....	19
Şekil 3.6. Karşı Basıncılı Çok Kademeli Türbin Sisteminde Sıcak Su Çıkışlı Eşanjör Kullanımı.....	20
Şekil 3.7. Tek Boyutlu Sistem İle Bileşik Isı-Güç Sistemlerinin Enerji Sağlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	22
Şekil 3.8. Tek Boyutlu Sistemlerde Sıcaklık-Entropi Diyagramı.....	23
Şekil 3.9. Bileşik Isı-Güç Üretim Sistemlerinde Sıcaklık-Entropi Diyagramı.....	24
Şekil 3.10. Isı ve Elektrik Beraber Üretilmesi.....	28
Şekil 3.11. Buhar ve Elektrik Ayrı Ayrı Üretilmesi.....	28
Şekil 4.1. Üst Çevrimli Bileşik Isı-Güç Üretim Sistemleri.....	30
Şekil 4.2. Alt Çevrimli Bileşik Isı-Güç Üretim Sistemleri.....	31
Şekil 4.3. Buhar Türbinli ve Kondensersiz Bileşik Isı-Güç Üretim Sisteminin Çevrimi.....	33
Şekil 4.4. Buhar Türbinli ve Kondenserli Bileşik Isı-Güç Üretim Sisteminin Çevrimi.....	34
Şekil 4.5. Buhar Türbini Çeşitleri.....	35
Şekil 4.6. Gaz Türbini Prensip Şeması.....	36
Şekil 4.7. Açık Çevrimli Gaz Türbinli Sistem.....	37
Şekil 4.8. Kapalı Çevrimli Gaz Türbinli Sistem.....	38

Şekil 4.9. Eşanjör ve Reaktör Kullanılan Yanma Odası.....	38
Şekil 4.10. Ateşlemesiz Atık Isı Kazanlı Sistem.....	39
Şekil 4.11. İlave Ateşlemeli Atık Isı Kazanlı Sistem.....	40
Şekil 4.12. Buhar Enjeksiyonlu Çevrim Sistemi.....	41
Şekil 4.13. Gaz Türbinli Sistemde Buhar Türbininin Kullanıldığı Sistem.....	42
Şekil 4.14. Gaz Türbinli Sistemde Egzos Gazının Direkt Kullanımı.....	42
Şekil 4.15. Gaz Motorlu Bileşik Isı-Güç Üretim Sistem Çevrimi.....	43
Şekil 4.16. Dizel Motorlu Bileşik Isı-Güç Üretim Sistemi.....	46
Şekil 4.17. İçten Yanmalı Motorlu Sistemin Otomatik Yolalma Düzeni.....	47
Şekil 4.18. O.G. Kojenerasyon Şalt Tesisi(İki Türbinli Sistem) .....	49
Şekil 4.19. O.G. Kojenerasyon Şalt Tesisi(Tek Türbinli Sistem,Regel Trafolu) .....	50
Şekil 4.20. Karşı Basınçlı Türbin İle Kombine Çevrim.....	51
Şekil 4.21. Yoğuşurma Türbini İle Kombine Çevrim.....	52
Şekil 4.22. İki Kademeli Atık Isı Kazanı Kullanım Sistemi.....	53
Şekil 4.23. İki Kademeli Atık Isı Kazanı ve Kondenser Kullanım Sistemi.....	54
Şekil 5.1. Klasik Sistemin Şematik Gösterimi.....	58
Şekil 5.2. Buhar Türbinli Bir Çevrimin Şematik Gösterimi.....	60
Şekil 5.3. Gaz Türbinli Basit Çevrimin Şematik Gösterimi.....	64
Şekil 5.4. Kombine Çevrimin Şematik Gösterimi.....	66
Şekil 5.5. Endüstri Tesisinin Ortalama Günlük Elektrik Enerjisi Gereksinimi.....	70
Şekil 5.6. Endüstri Tesisinin Ortalama Isı Enerjisi (Buhar) Gereksinimi.....	70
Şekil 5.7. Birim Tesis Maliyetinin Güce Göre Değişimi.....	71
Şekil 5.8. Birim İşletme Masrafının Güce Göre Değişimi.....	72
Şekil 5.9. $x=10...70$ MW Aralığında $M_G$ , $C_G$ ve $C'$ 'nin $x$ 'e Göre Değişimi.....	73
Şekil 5.10. $x=10...70$ MW Aralığında Yatırımın Geri Ödeme Süresi(H)'nin x'e Göre Değişimi.....	74
Şekil 5.11. $x=19.5...20.5$ MW Aralığında, Yatırım Geri Ödeme Süresinin $x$ 'e Bağlı Değişimini Daha Hassas Olarak Gösteren Grafik.....	75
Şekil 5.12. Yatırımın Geri Ödeme Süresinin, Şebekenin Elektrik Satış Fiyatına Göre Değişimi.....	75
Şekil 5.13. Yatırımın Geri Ödeme Süresinin, Şebekenin Elektrik Geri Alış Fiyatına Göre Değişimi.....	76
Şekil 5.14. Yatırımın Geri Ödeme Süresinin, Yakıt Fiyatına Göre Değişimi.....	77

Şekil 7.1. Ele Alınan Tesisin Basit Modeli.....	87
Şekil 7.2. Ele Alınan Tesise İlişkin Güç ve Buhar Talebi Eğrileri.....	88
Şekil 7.3. Sistemin Fonksiyon Blok Diyagramı.....	90
Şekil 7.4. Sistemin Ortalama Elektrik Üretim Miktarı.....	91
Şekil 7.5. Sistemde Üretilen Buharın Ortalama Basıncı.....	92
Şekil 7.6. Sistemde Üretilen Ortalama Buhar Miktarı.....	93
Şekil 7.7. Sistem Çıkış Egzos Gazı Ortalama Sıcaklığı.....	94
Şekil 7.8. Sistemin S Domenindeki Blok Diyagramı.....	96
Şekil 7.9. Alt-Sistem Blok Diyagramı.....	97
Şekil 7.10. Sisteme Uygulanan Adım Fonksiyonu.....	98
Şekil 7.11. Sisteme Uygulanan Adım Fonksiyonu Cevabı.....	98
Şekil 7.12. Sistemin Kademeli Denetim Diyagramı.....	100
Şekil 7.13. P Tipi Denetim Sonuç Eğrisi.....	101
Şekil 7.14. Sistemin PI Denetim Elemanlı Diyagramı.....	102
Şekil 7.15. Sistemin PI Denetim Elemanına Cevabı.....	103
Şekil 7.16. Sistemin PID Denetim Elemanlı Diyagramı.....	104
Şekil 7.17. Sistemin PID Denetim Elemanına Cevabı.....	105



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 4.1. Aktif Buhar Basınç Seviyelerine Göre Elektrik Enerjisi Üretimi.....	32
Tablo 5.1. Buhar Türbinli Çevrimlere İlişkin Toplam Maliyetler(1990 yılında) .....	68
Tablo 5.2. Tablo 5.3.'te Verilen Gaz Türbini Modellerinin Kullanıldığı Çevrimlere İlişki Toplam Yatırım(Tesis) Maliyetleri(M\$).....	68
Tablo 5.3. Değişik Gaz Türbinli Çevrimlere İlişkin Veriler.....	69
Tablo 5.4. $x=19,8...20,2$ MW Aralığında Geri Ödeme Süresinin $x$ 'e Bağlı Değişim Tablosu.....	74
Tablo 6.1. Elektrik Üretimindeki Yakıt Kullanımı(bin ton petrol) .....	79
Tablo 6.2. Elektrik.....	80
Tablo 6.3. Bileşik Isı Güç Üretim Sistemleri.....	80
Tablo 6.4. Yıllara Göre Bileşik Isı-Güç Üretim Santrallerindeki Gelişme Beklentileri.....	81

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Enerji tüketimi son yıllarda hızla artmaktadır. Enerji ihtiyacının hızla artmasına karşın enerji kaynakları, bu ihtiyacı yeterince karşılamaya yetmemekte ve zamanla tükenmektedir. Türkiye, coğrafi yapısı itibariyle hidrolik enerji kaynağı bakımından zengindir. Ancak hidrolik enerjiden yararlanmak amacıyla kurulan santraller, masraflı, yapımı uzun zaman alan ve ihtiyacı sınırlı süre ile karşılayan santrallerdir. Yenilenebilir enerji kaynakları: güneş ışını, rüzgar enerjisi gibi doğal enerji kaynaklarından faydalanmak günümüz şartlarında çok zordur. Çünkü gelişmiş bir teknoloji gerektirdiklerinden maliyetleri çok yüksek olduğu gibi üretimleri mevsimlere, gündüz gece durumuna göre değişmektedir. Nükleer santraller ise, daha önceki nükleer kazalar nedeniyle tepki toplamıştır. Her ne kadar yüksek bir teknoloji ve koruma ile güvenilir biçimde yapılma imkanı olsa da, bu kazalardan dolayı güvenilirlikleri sarsılmıştır.

Enerji konusunda önemli sorunların olduğu ve günümüz teknolojisi ile bu sorunu çözecek bir enerji biçimi bulunamadığı için şu an kullanımdaki birincil enerji kaynaklarından yüksek verim elde edilmesi gerekmektedir. Daha çok verim sağlamak amacıyla, verimli enerji dönüştürme çevrimleri kullanımına gidilmiştir. Bu amaçla elektriksel, mekaniksel güçten ve ısıdan aynı anda yararlanılabilen Bileşik Isı-Güç Üretim Sistemleri geliştirilmiştir.

Endüstri tesislerinde hem elektrik enerjisine hem de çeşitli basınç seviyelerinde buhar ihtiyacı vardır. Elektrik enerjisi üreten tesislerde ısıtma için ayrıca bir kazan ve ek sistemler kuruludur. Isıtma sistemi için de yakıt tüketilmektedir. Bu sistemlerde buhar, bir atık olarak değerlendirilir. Bileşik Isı-Güç Üretim Sisteminde ise daha önce atık olarak değerlendirilen çeşitli basınç seviyelerindeki buhar,

sistemin ihtiyacı olan yerlerde kullanılır. Böylece hem verim artırılmış olur hem de ek yakıt ve donanım maliyeti ortadan kalkmış olur.

Bileşik Isı Güç Üretim Sistemlerinde elektrik enerjisi talebinin artması halinde dışarıdan elektrik satın alınabilmeli ve bu sistemler tarafından üretilen elektriğin talepten fazla olması halinde dışarıya elektrik satılabilmesi için, elektrik şebekesi ile de uyumu sağlanmalıdır.

Ekonomik olarak, ülke genelinde Birleşik Isı-Güç Üretim Sistemi uygulamalarının yaygınlaşması, elektrik üretim kapasitesindeki artış sonucunda yeni santrallerin yapılması zorunluluğunu azaltacaktır. Bütün bunların yanında bu santrallerin geri ödeme süreleri ise iki üç yıl civarındadır. Buradan da bu sistemin oldukça ekonomik olduğu görülmektedir.

Bileşik Isı Güç üretimi çerçevesinde birincil enerjiden sağlanan tasarrufla aynı oranda çevresel açıdan da olumlu etkiler görülmektedir. Diğer santrallerde bir birim elektrik enerjisi üretebilmek için üç birim ısı enerjisi gerekmektedir. Halbuki Bileşik Isı-Güç üretiminde bir birim elektrik enerjisi üretebilmek için bir buçuk birim ısı enerjisi yeterli olmaktadır. Bu da, atmosfere verilen kirletici emisyon miktarlarının toplamında yüzde elli civarında azalma demektir. Atmosfere verilen değişik kirleticilerin miktarı, kullanılan yakıtın tipine bağlı olarak değişmektedir. Bileşik Isı-Güç üretim sistemlerinde yakıt olarak yaygın şekilde doğal gaz kullanılmaktadır. Bunun sonucunda, kömürün yarattığı kül ve kükürt ile fueloilin sebep olduğu diğer emisyonlar yok edilebilmektedir. Bunun da ötesinde, karbondioksit emisyonlarının yarattığı olumsuz çevresel etki önemli oranda azaltılabilir. Ancak bu azalma etkisi, yanma sistemine ve kullanılan yakıtı da bağlı olarak değişmektedir. Bileşik Isı Güç Üretim Santralleri'nin enerji üretimindeki özellikleri ve verimlilikleri nedeni ile kullanımı yaygınlaşmıştır.

Mühendislikte gerçek sistemlerde deney yapmanın pratik olmadığı durumlarda fiziksel modeller kullanılır. Bu fiziksel modelleri temsil eden matematiksel modeller vardır. Bileşik Isı Güç Sistemlerinin matematiksel modeli oluşturularak sistemin kontrolü gerçekleştirilebilmektedir. Oluşturulan matematiksel model kullanılarak

sistem denetimi yapılır. Bu santrallerde, kontrol sistemleri kullanılarak verim daha da artırılabilir

Bu güne kadar Bileşik Isı- Güç Üretim Santralleri'nin çeşitli modelleri oluşturulmuştur(Kola 1989)(Hannett,Khan 1993). Bu modeller daha çok deneysel çalışmalara dayanmaktadır. Bu çalışmada, çalışmakta olan bir tesisin dataları kullanılarak sistemin hem fonksiyonel modeli hem de kontrol amaçlı S domeninde modeli oluşturulmuştur.

Bileşik ısı ve güç santrallerinde elektrik ve ısı üretiminin gerçekleşmesi için geçen safhalar vardır. Bu safhalarda etkisi bulunan sıcaklık, basınç, hız gibi etkenlerin denetim sistemlerinden faydalanılır.

Denetim elemanları ile sistemin kontrollü işlemesi sağlanır. Sistemden istenilen çıkışın elde edilebilmesi için giriş değişkenlerinde yapılması gereken değişiklikler belirlenir. Böylece sistemin daha verimli ve kontrollü işlemesi sağlanmış olur.

Bölüm 2 'de Bileşik ısı ve güç sistemlerinde kullanılan başlıca yardımcı elemanların işlevleri anlatılmıştır.

Bölüm 3 'de genel elektrik enerji üretiminde kullanılan sistemler hakkında bilgi verilmiş, çeşitli verim artırma yöntemleri ve Bileşik Isı- Güç Üretim Sistemlerine geçişin nedenleri açıklanmıştır.

Bölüm 4 'te Bileşik Isı Güç Üretim Sistemlerinin değişik tipleri ve çevrim şekilleri incelenmiştir.

Bölüm 5 'te Bileşik Isı Güç Üretim Sistem kapasitesi ve türünün belirlenmesi, kullanılacak tesis ve üretim maliyet denklemleri, bütün çevrimler için oluşturulmuştur.

Bölüm 6 'da Türkiye'deki Bileşik Isı Güç Üretim Sistemleri hakkında istatistiksel bilgiler verilmiştir. Ayrıca çevre kirliliği açısından güç üretim sistemleri incelenip

bileşik ısı güç üretim sisteminin çevreye en az zararı olan sistem olduğu gösterilmiştir.

Bölüm 7 'de örnek alınan tesisin dataları temel alınarak oluşturulan model hakkında bilgi verilmiştir. Sistemin fonksiyonel modeli ve kontrol amaçlı S domeninde modeli oluşturulmuştur. Bu sistemin elektrik üretimi kontrolü yapılmıştır.

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre Bileşik Isı Güç Üretim Sistemlerinin hangi durumlarda kullanılabileceğine ilişkin öneriler ve çevre açısından üstünlükleri ve bu sistemde kullanılabilecek otomatik sistem denetiminin yararları vurgulanmıştır.

## BÖLÜM 2

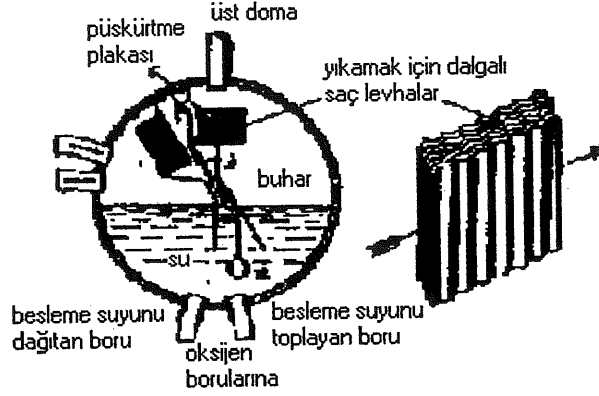
### BİR GÜÇ SANTRALİNDE YARARLANILAN ÖZEL ELEMANLAR

Bir güç santralının elektrik ve ısı üretebilmesi için özel donanımlara ihtiyacı vardır. Buhar türbinli sistemlerde ihtiyaç duyulan buhar kazandan elde edilir ve daha verimli ürün elde etmek için ek olarak süper ısıtıcı, tekrar ısıtıcı, ekonomizer, hava ön ısıtıcısı gibi elemanlardan faydalanılır. Gaz türbinli sistemlerde kompresör, yanma odası gibi ek donanımlar vardır.

#### 2.1. Buhar Üretim Tesisi (Kazan)

Buhar üretim tesislerinin amacı : yakacaklarda kimyasal enerji olarak depo edilmiş olan enerjiyi bir buhar kazanı içinde kontrollü olarak yakıp ısı enerjisine çevirmek ve bu ısı ile özel olarak hazırlanmış olan sudan faydalanılarak, atmosfer basıncından daha yüksek basınçlı buhar elde etmektir.(Bayram 1978)

Buhar kazanlarında üretilen buharın kuru buhar olması istenir. Buharın içindeki su damlacıkları, birçok yabancı madde içerir. Dolayısıyla kızdırıcıları ve buhar türbin kanatlarını kirletip aşındırır. Buhar kazanlarındaki kızdırıcılar(Şekil 2.1.), kazandaki doymuş buharı kurutmak ve istenilen bir sıcaklığa kadar ısıtmak için kullanılır.



Şekil 2.1. Buhar Kurutucu Tesisatı

Buhar tesisi yalnızca kazandan oluşmaz. Buhar tesisi, su soğutmalı fırın, süper ısıtıcı (süperheater), tekrar ısıtıcı (reheater), ekonomizer ve hava ısıtıcısı gibi ek ünitelerin bileşimidir. Maksimum güvenilirlik ve ekonomiklik için bütün bu birimler diğeriyle uyumlu bir biçimde çalışmalıdır (Güney 1993).

## 2.2. Isı İşlemlerindeki Ek Elemanlar

Isı sistemlerinde sistemi daha yararlı, verimli kullanabilmek için bazı ek birimlerin kullanılması gereklidir. Bunlar: atık ısı kazanı, süper ısıtıcı, tekrar ısıtıcı, ekonomizer, hava ön ısıtıcısı ve ilave ateşlemeli atık ısı kazanıdır.

### 2.2.1. Atık ısı kazanı

Bu konuda bahsedilen atık ısı, yanmayan gazdaki hissedilebilir sıcaklık anlamına gelmektedir. Gerekli basınçtaki doymuş buharın yüksek sıcaklıktaki işlemlerinden sonra kullanılmış olan gaz, yani atık gaz, sürekli olarak boşaltılır. Kazanlar da bu işlemin yapıldığı yerlere yerleştirilir. Atık ısı kazanları uygulamalarında gaz sıcaklığı genellikle 1000 F°(530°C) nin üzerine ayarlanır. Yüksek gaz sıcaklığı, düşük hızlarda verimli ısı transferine izin verir. Düşük gaz sıcaklığında verimli ısı transferi sağlamak için yüksek hız gerekir (Britannica).

### 2.2.2. Süper ısıtıcı (Süperheater)

Kapalı kap içindeki su, kaynama noktasına ısıtıldığı zaman oluşan buhar, basıncın artmasına neden olur. Basınç artarken kaynama sıcaklığı da artar. Buhar genelde sabit basınçlı kazanda üretilir. Sıvı halden sabit basınçlı buhar durumuna geçiş boyunca içinde sıvı içeren buhar, buharlaşma tamamlanıncaya kadar sabit sıcaklıkta kalır. Bütün su, buhara dönüştüğü zaman sıcaklık artmaya başlar. Bu durum, buharın çok ısıtılmasına neden olur. Yani ısıyı artırma işlemi süper ısıtıcı tarafından yapılır (Moran,Shapiro 1992)(Çengel,Boks 1989).

### 2.2.3. Tekrar ısıtıcı (Reheater)

Bu ek ısıtıcıların kullanılmaya başlanması ile yakıttan tasarruf edilmiştir. Tekrar ısıtıcı basit olarak ikinci bir buhar süper ısıtıcı'dır. Tekrar Isıtıcı'dan çıkan buhar, türbinin düşük basınç veya ara basınç bölümüne iletilir(Moran,Shapiro 1992)(Çengel,Boks 1989).

### 2.2.4. Ekonomizer

Ekonomizer, bir ısı değiştiricisidir. Yüksek basınçlı besleme suyunun ısını kazan basıncına uygun doyma sıcaklığına yükseltir. Bu işlem, en son kullanılan süper ısıtıcı veya tekrar ısıtıcıdan bırakılan gazlar ile yapılır. Bu gazlar 700°F ile 1000°F (370°C 530°C) arasındaki bir sıcaklıkta ekonomizere girer. Ekonomizerler, genellikle son süper ısıtıcı-tekrar ısıtıcı ve hava-ön ısıtıcısı arasına yerleştirilir .(Moran,Shapiro 1992)(Çengel,Boks 1989).

### 2.2.5. Hava ön-ısıtıcısı

Ekonomizere benzer. Atmosfere atılmadan önce egzoz gazının enerjisinden faydalanılır. Kazanı terkeden baca gazlarından ısı çıkararak yanma havasına ısı ilave edilir. Bu birimin kullanımı ısı geri kazanılmasına, ekonomizerin çıkarılmasına ve geri besleme suyunun ısıtılması aşamasında türbin kullanımına izin verir. Hava ön



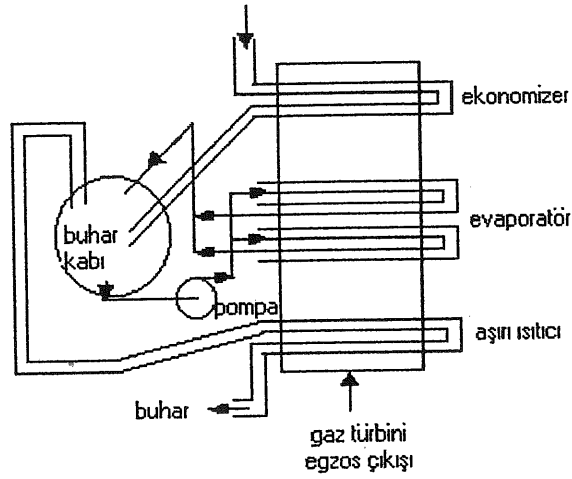
ısıtıcıları, egzost gazı sıcaklığının düşük değere inmesine neden olur.  
(Moran,Shapiro 1992)(Çengel,Boks 1989)

#### 2.2.6. İlave ateşlemeli atık ısı kazanı

Gaz türbinin egzost sıcaklığını yükseltmek amacıyla ilave yakıt kullanılmaktadır. Bir gaz türbini egzostu, yanma işleminde kullanılabilir yeterli oksijeni (% 15) içermekte olup, bu atık ısı kazanında yakıtın yanmasını da sağlamaktadır. Dolayısıyla, aynı miktarda buharı üretmek için çevre(atmosfer) havasını kullanan bir kazanıkinden yaklaşık % 10 – 20 daha az yakıt tüketilmesi sağlanmaktadır.

Tek basınç düzeyli bir atık ısı kazanı üç bölümden oluşmaktadır. Gaz türbinin egzostu, atık ısı kazanının aşırı ısıtıcı bölümünden girip ekonomizer bölümünden çıkmakta, besleme suyu ise atık ısı kazanının ekonomizer bölümüne girmekte ve sıcaklığı , buhar kazanının tasarım basıncında doymuş su sıcaklığına yükselmektedir. Atık ısı kazanının baca sıcaklığı ne kadar düşük olursa, geri kazanılan enerji o kadar fazla olacaktır. Bu nedenle ekonomizerde, besleme suyu sıcaklığı için uygulanabilir en düşük sıcaklığın kullanılması gerekir. Fakat bu sıcaklık, keyfi olmayıp gaz tarafındaki korozyon oluşumunu engellemek amacıyla sınırlandırılmıştır.

Evaporatör bölümünde, su tarafında soğrulan ısı enerjisi ile buhar üretilmekte, buhar ve su, buhar kabında birbirinden ayrılmakta, buhar kabından gelen doymuş buhar, daha sonra aşırı ısıtıcıda ısıtılmaktadır. Bu arada kazana 540°C civarında giren egzost gazı da kazanı 120°C civarındaki sıcaklıkta baca yoluyla terk etmektedir.  
(Moran,Shapiro 1992)(Çengel,Boks 1989).



Şekil 2.2. Atık Isı Kazanı

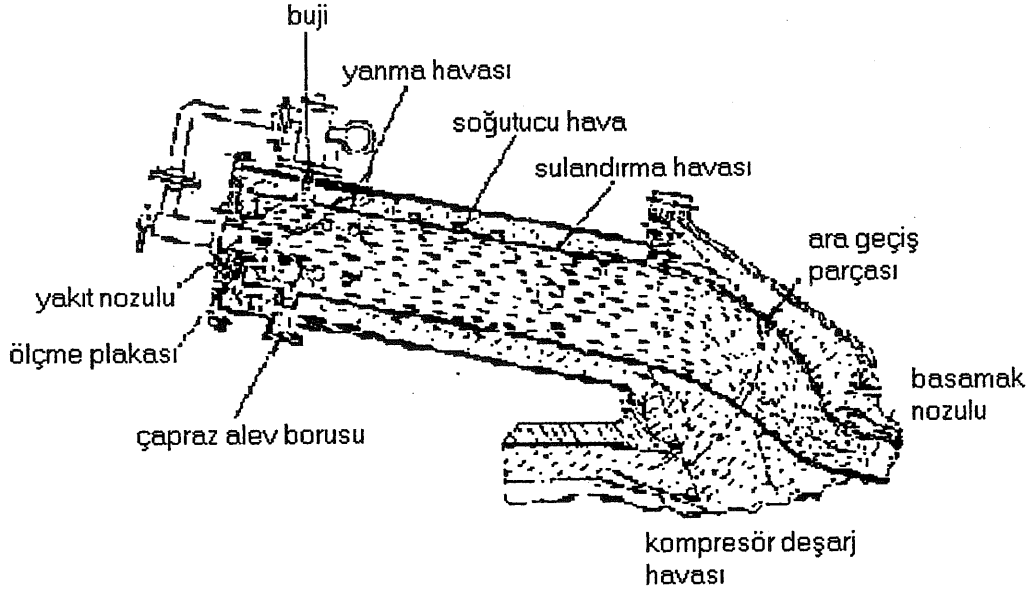
### 2.3. Kompresör

Bu cihaz, gazın hacmini düşürerek basıncını artırır. Hava, en sık kullanılan gazdır. Fakat doğal gaz, oksijen, azot ve endüstriyel açıdan diğer önemli gazlar da sıkıştırılabilir (Britannica)

### 2.4. Yanma Odası ( Reaktör )

Sıkıştırılmış hava 7 - 11.5 bar basınç ve takriben 360°C lik bir sıcaklıkla kompresörden çıkar ve ters yönlü olarak yanma odası ile kovan arasındaki dairesel hacme girer. Memelerden püskürtülen yakıt ile aksel kompresörden gelen havanın bir kısmı karıştırılır. Sıcak yanma gazları sıkıştırılan havanın geri kalan kısmını ısıtırlar. Bu olay geniş bir hava / yakıt oranı aralığı içerisinde çalışma karalığını koruyarak meydana gelmelidir.

Eğer yakıt, yakıcıda mevcut tüm hava ile karıştırılsa idi, düşük yakıt / hava oranı sebebiyle yanma mümkün olmazdı bu sebeple yakıt, havanın bir kısmı ile karışıp yandığı reaksiyon odasına püskürtülür. Reaksiyon alanı takriben yanma odası uzunluğunun yarısıdır. Sıcak gazlar, fazla hava ile yanma odasının geri kalan kısmında karıştırılır. Sonuç, türbin malzemelerinin dayanabileceği sıcaklıkta bir karışımdır. (Britannica)(Gaz Türbini1997).



Şekil 2.3. Yanma Odası İçinde Hava Akışı

## 2.5. Türbinler

Sistemde üretilen buhar veya gaz ürünlerini kullanarak mekanik enerji elde edilmesini sağlayan elemanlardır. Kojenerasyon sistemlerinde iki çeşit türbin kullanılır. Bunlar: gaz türbini ve buhar türbinleridir.

### 2.5.1. Gaz türbini

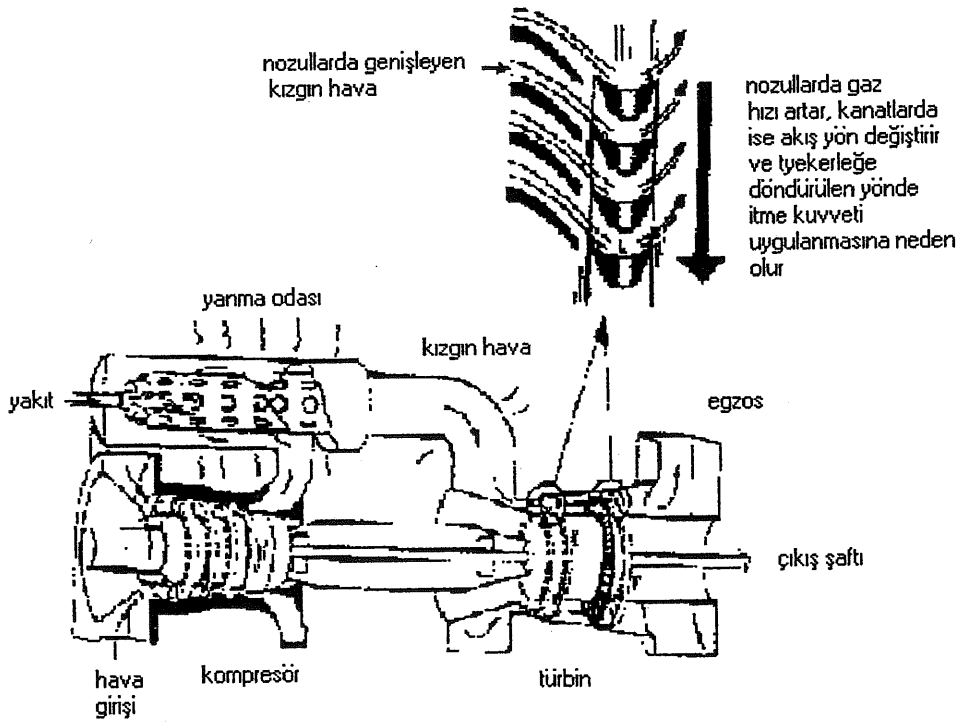
Gaz türbini bir araba motoru gibi yakıt enerjisini mekanik enerjiye çeviren bir makinedir. Sıkıştırılmış havayı ısıtıp memelerde genişleten türbin, çıkış şaftı ile bir generatör veya kompresörü çalıştırır.

Makinenin içerisindeki sıkıştırılmış havanın sağlanması bir kompresör ile gerçekleştirilir. Sıkıştırılmış hava, yakıtla ısıtıldığı çok sayıdaki yanma odaları

içerisine gönderilir. Burada yakıt, ağır yağ, motorin, kerozen, doğal gaz, gaz veya sıvı yakıt kombinasyonlarından biri olabilir.

Gaz türbinlerinde önemli olan yakılan yakıtın türü değil, kızgın havanın elde edilmesidir. Yaklaşık 1200°C deki kızgın hava memelerde kısmen hız enerjisine dönüşebilecek olan belli miktardaki ısıyı ihtiva eder. Yüksek hız kazanan hava gaz türbini seyyar kanatlarında yön değiştirir ve türbin tekerleğinin dönmesini sağlayacak

olan bir itme kuvveti oluşturur (Gaz Türbini1997).



Şekil 2.4. Gaz Türbininin Çalışma Prensibi

### 2.5.2. Buhar türbini

Buhar türbini, iki farklı enerji değişiminin yer aldığı ısı motorunun bir çeşididir. Buharın elde edilebilir ısı enerjisi önce uygun şekillendirilmiş bölümlerde veya fişkırmalar olarak dağılmasını sağlayan memelerdeki buharın genişlemesi vasıtasıyla kinetik enerjiye çevrilir. Daha sonra bu kinetik enerjinin bir kısmı döner disk veya

silindire monte edilen bükümlü kanatlara doğru uygun açıda püskürmeyi yönlendirilir. Böylece bükümlü kısmı terk ederken oluşan püskürme reaksiyonuyla mekanik enerjiye çevrilir.

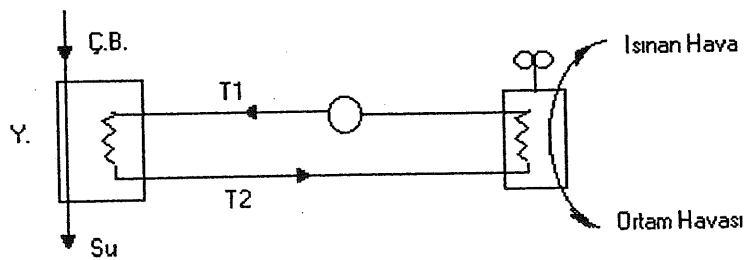
Döner harekete neden olan kanatlardaki basınç, bu kanatçıkların bulunduğu bölüm boyunca oluşan püskürme akımının momentini değiştirmek için kullanılır.

Türbindeki yayılma ve yoğuşma kayıpları azdır. Reaksiyon pistonlarının uçları, labirentler ve bilezikler boyunca olan temizliğe bağlı olarak kayıplar oluşur. Buhar dolu hücrelerdeki disk ve pistonlarda, yüksek hızlı buharın oluşturduğu sürtünme kayıplarıyla beraber piston ve memeler boyunca püsküren yüksek hızlı buharın sürtünmesi türbin verimliliğinde kaydedeğer bir etkiye sahiptir (Ağabey 1994).

## 2.6. Yoğuşturucu (Kondenser )

Yoğuşturucu atık ısı enerjisini soğutma suyuna aktarır. Soğutma suyunun çevrim şekline göre sınıflandırılır. Çevrim şekli çevrede bol miktarda su olup olmasına ve iklim koşullarına göre belirlenir.

### a) Kapalı Çevrim

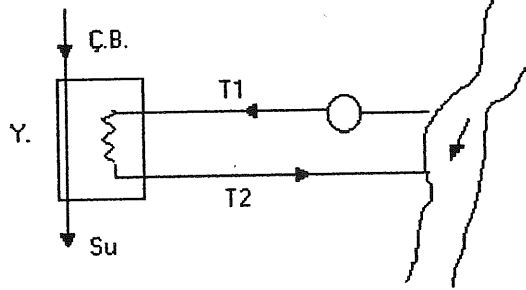


Şekil 2.5. Yoğuşturucu Kapalı Çevrim Şeması

T1 sıcaklığıyla yoğuşturucuya giren, T2 sıcaklığıyla ısı yükselmiş olarak çıkan su, soğutucu olarak isimlendirilen cihaza verilir. Bu yöntem suyun az bulunduğu ve buharlaşma ihtimali yüksek olan yerlerde kullanılır.

## b) Açık Çevrim

### 1. Yöntem

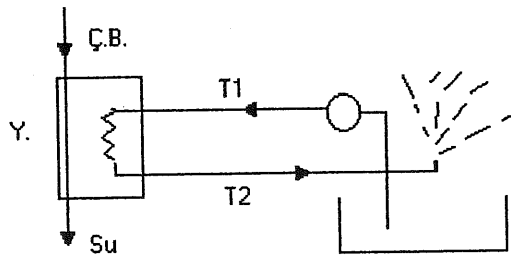


Şekil 2.6. Yoğuşturucu Açık Çevrim Şeması

Bu yöntem su kaynağı olarak akarsu veya göl gibi yerlerin bulunduğu bölgelerde kullanılır.

### 2. Yöntem

Bu yönteme fıskiye yöntemi denir. Suyun buharlaşmasının çok önemli olmadığı ve buharlaşmanın az olduğu yerlerde kullanılır. Püskürtülen suyun soğuma yüzeyi çok büyüdüğü için havayla temas edince kendiliğinden soğur. Hazneye dökülen su pompa ile yoğuşturucuya verilir.

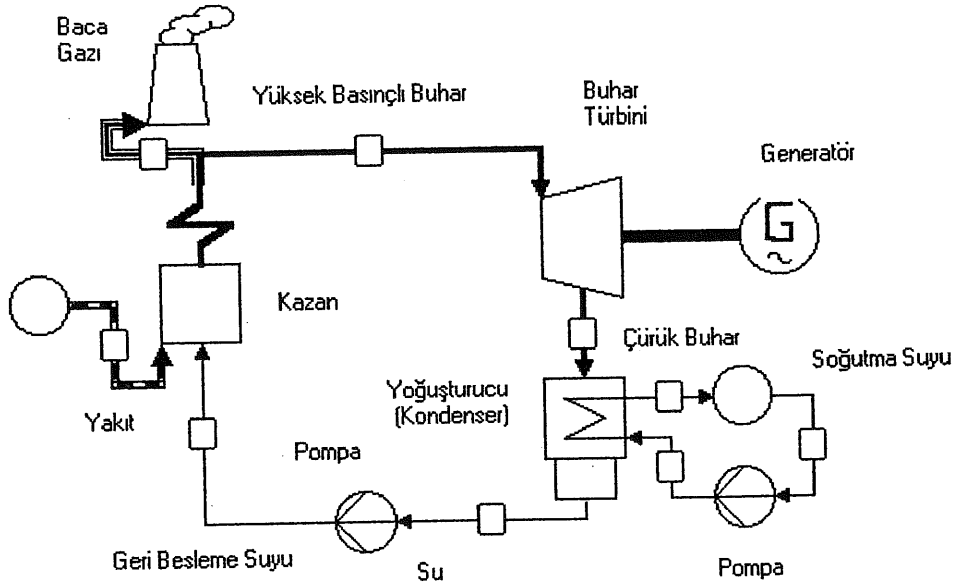


Şekil 2.7. Açık Çevrimli Yoğuşturucuda Fıskiye Yöntemi

## BÖLÜM - 3

### ENERJİ ÜRETİM SİSTEMLERİNİN İŞLETİLMESİ

Buhar ve elektrik, sanayi için en gerekli enerji kaynaklarıdır. Tek boyutlu sistemlerde buhar; katı yakıt, fuel-oil veya gaz gibi yakıtların brülörlerde yakılması sonucu kazan ünitelerinde üretilmektedir. Elektrik ise, genellikle satın alınarak proseslere kullanım için verilir veya santralde üretilir(Sill,Zörner 1996).



Şekil 3.1. Tek Boyutlu Sistemde Basit Çevrim

Şekil 3.1.deki sistemde buhar üretim tesisi olan kazandan baca gazı ve yüksek basınçlı kızgın buhar çıkar. Yakıt enerjisinin %18'i baca gazına, % 82'si yüksek basınçlı buhara verilir.

Yüksek basınçlı kızgın buharın enerjisi yüksektir. Buhar türbininde enerjisi azalır ve çürük buhar olarak çıkar. Buhar türbinine verilen enerji, mekanik enerjiye ve alternatörle elektrik enerjisine dönüştürülür. Türbinden çıkan çürük buhar

yoğuşturucuya verilir. Kendi ısını soğutma suyuna aktarır ve su olarak çıkar. Su, pompa ile kazana verilir.

Tek boyutlu sistemlerde baca gazı ve soğutma suyuna verilen enerjiden yararlanarak verim yükseltilebilir.

### **3.1. Tek Boyutlu Sistemlerde Verimi Yükseltme Yöntemleri**

Bu sistemlerde verimi yükseltmek için değişik uygulamalar yapılır. Bunlar:

- atık olarak görünen baca gazından faydalanmak,
- türbinlerin çok kademeli yapılması,
- karşı basınçlı çok kademeli türbinlerin kullanılmasıdır.

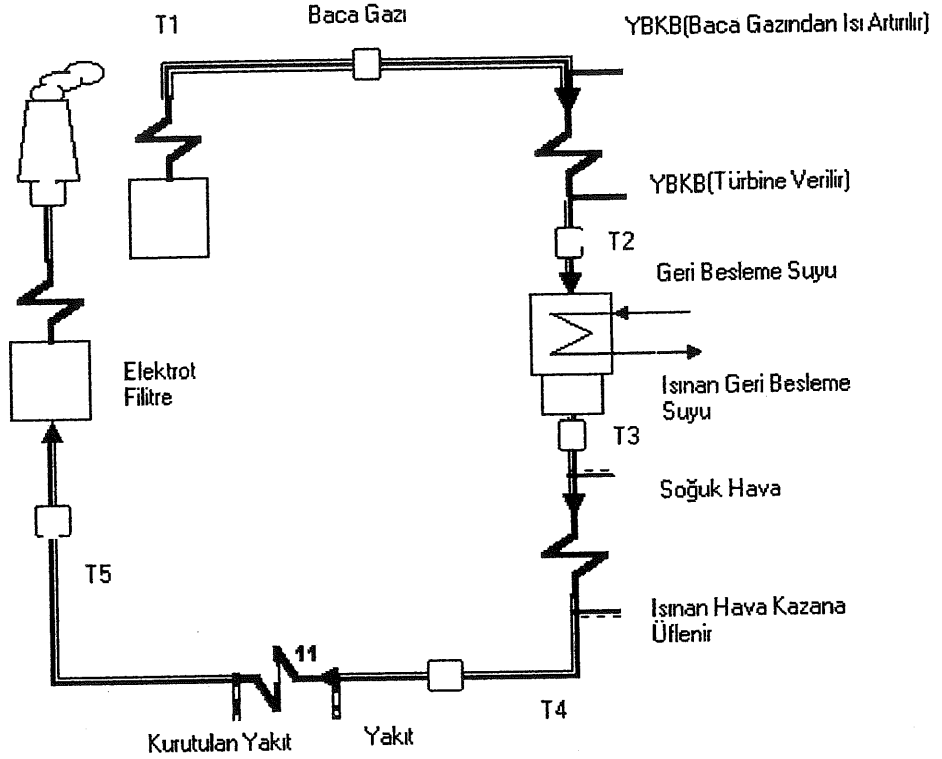
#### **3.1.1. Baca gazından yararlanmak**

- a) Üretilen yüksek basınçlı kızgın buhar, baca gazından geçirilerek enerjisi yükseltilir. Böylece türbin ve generatör sisteminden daha yüksek verim elde edilebilir.
- b) Geri besleme suyunun sıcaklığı artırılabilir. Böylece daha önce kazanda yakıt tüketilerek elde edilip besleme suyuna verilen ısının bir kısmı, baca gazından karşılanmış olur. Bu durum yakıtın tüketiminde de azalmaya neden olur.
- c) Kazana sıcak hava üflenir. Kazanın sıcaklığı, hem kullanılan yakıtın kazanda yakılmasıyla hem de baca gazının kazana üflenmesiyle daha yüksek seviyeye çıkar. Eğer kazan ısısının belli bir sıcaklıkta olması isteniyorsa baca gazından aktarılan ısı nedeniyle bu seviyeyi elde etmek için kullanılan yakıt miktarı düşmüş olur.
- d) Baca gazı ile yakıt kurutulurak yakıtın yanma verimi yükseltilir.

Şekil 3.2. de baca gazından yararlanış biçimleri açıklanmıştır. Burada T1 baca gazının bu işlemlere tabi tutulmadan önceki ısısını, T2 ısı enerjisinin bir kısmını kazanı terkeden yüksek basınçlı kızgın buhara aktardıktan sonraki ısısını, T3 geri besleme suyu baca gazından geçirildikten sonraki ısısını, T4 baca gazı kazana



üflendikten sonraki ısıyı, T5 ise yakıt kurutulduktan sonra atık olarak filtreden geçirilen baca gazı ısını göstermektedir.



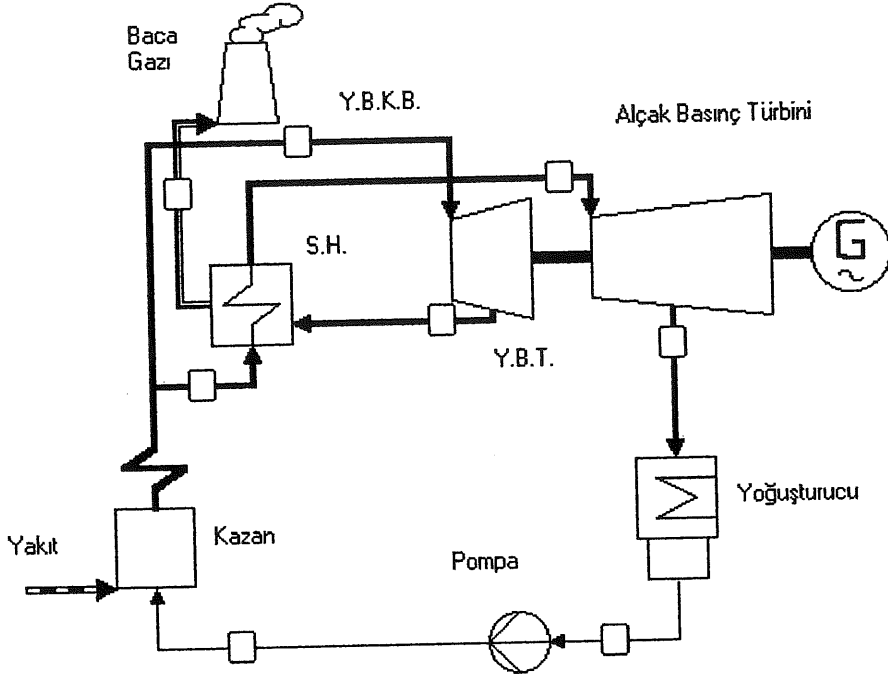
Şekil 3. 2. Baca Gazının Yararlanış Biçimleri

$$( T1 > T2 > T3 > T4 > T5 )$$

### 3.1.2. Türbinlerin çok kademeli yapılması

Türbinlere alçak basınç bölümünden önce ek olarak bir ara basınç alma donanımının eklenmesi ve oluşturulan bu tür tesislerde ısı enerjisi oranı geniş sınırlar içinde değiştirilebilir (Bayram 1978).

Bu tür yöntemle soğutma suyuna verilen enerji minimumda tutulmaya çalışılır.



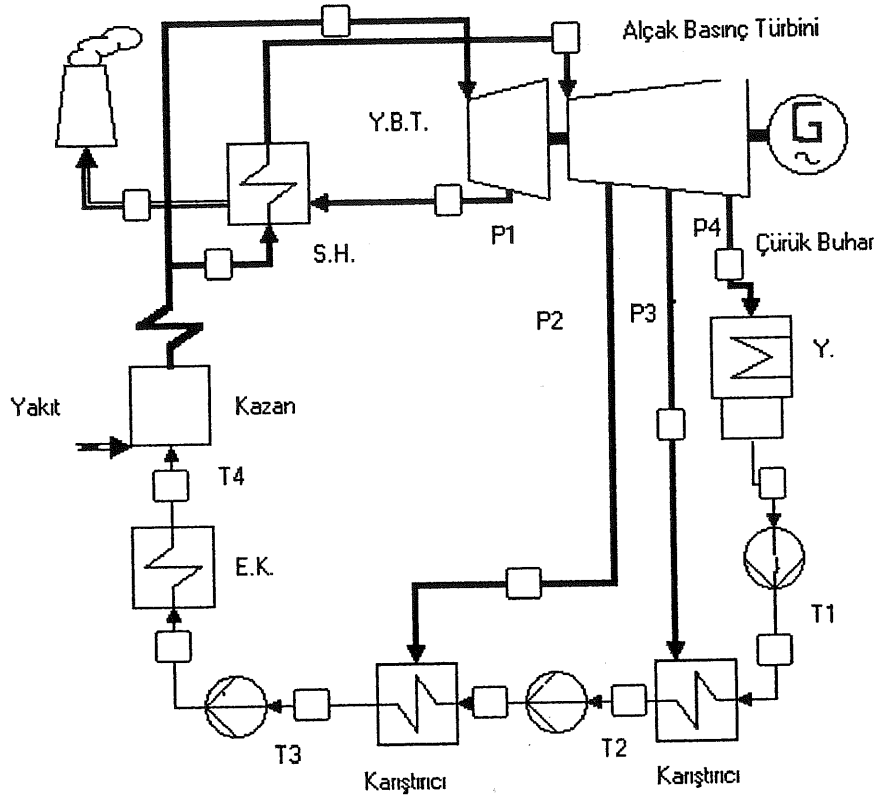
**Şekil 3.3. Çok Kademeli Türbin Kullanım Sistemi**

Şekil 3.3 teki sistemde, kazandan çıkan yüksek basınçlı buhar, süper ısıtıcı'da enerjisi artırılıp yüksek basınçlı türbine verilir. Çıkan buhar baca gazından yararlanarak çalışan tekrar ısıtıcı'dan geçirilerek enerjisi artırılıp alçak basınç türbinine verilir. Türbine verilen enerji, mekanik enerjiye ve alternatörle elektrik enerjisine dönüşür. Türbinden çıkan buhar yoğuşturucuya verilir ve geri besleme suyu elde edilir.

### 3.1.3. Karşı basınçlı çok kademeli türbin kullanılması

Bu sistemde iki yöntem uygulanır. Bunlardan ilki, sistemde karıştırıcı kullanılmasıdır. Bu yöntemle buhar ve su karıştırılır. Böylece geri besleme suyunun sıcaklığı artırılmış olur. İkincisi ise eşanjör kullanıldığı durumdur. Ara kademelerden alınan buharın ısısı değiştirilerek yoğuşturucuya verilir.

### a) Karıştırıcı Kullanıldığı Durum



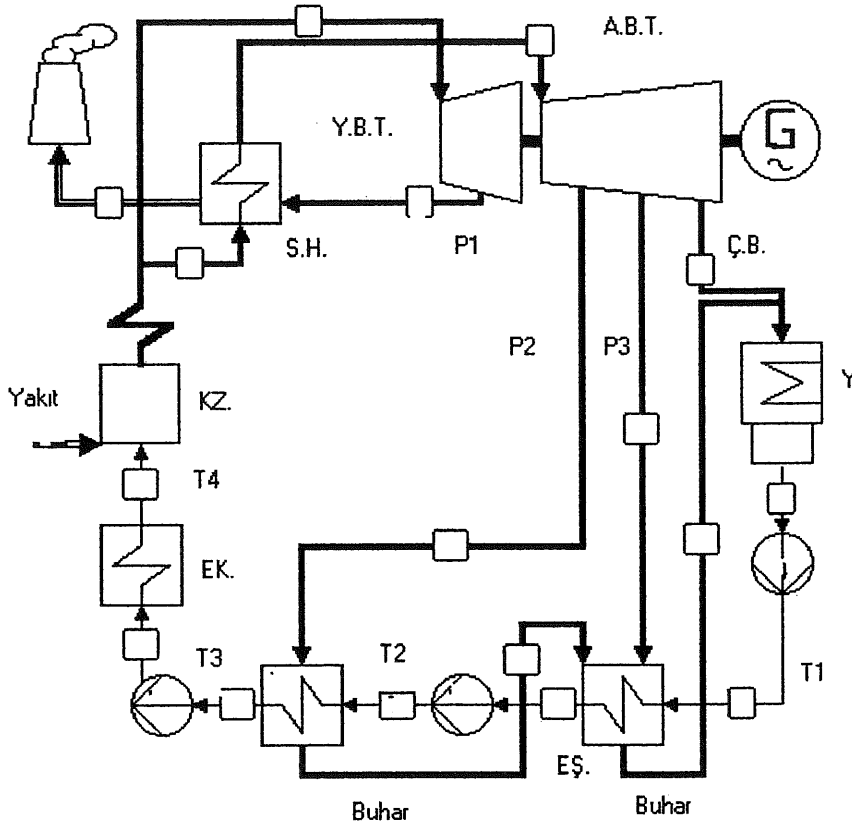
Şekil 3.4. Karşı Basıncılı ve Çok Kademeli Türbin Sistemi

$$(T_4 > T_3 > T_2 > T_1) \quad (P_1 > P_2 > P_3 > P_4)$$

Şekil 3.4. te alçak basınç türbininden çıkan buhar yoğuşturucudan çıkan su ile karıştırıcıda karıştırılıp su haline getirilir ve geri besleme suyunun da sıcaklığı artırılmış olur. Burada P1, türbinin yüksek basınçlı bölümünden alınan basıncı, P2,P3 ve P4 ise türbinin alçak basınç bölümünden alınan buharın farklı basınç seviyeleridir.

### b)Eşanjör Kullanıldığı Durum

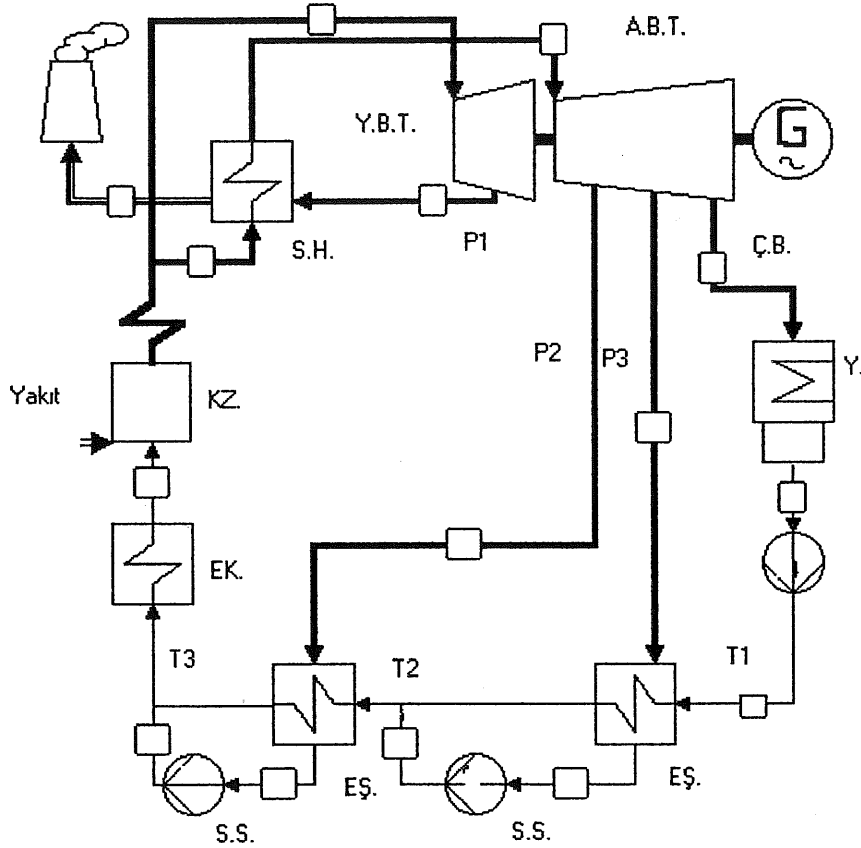
Eşanjör ısı değiştiricisidir. Eşanjör de sistemde iki şekilde kullanılır. Birincisinde buharın ısısı artırılıp gene buhar olarak yoğuşturucuya verilir. Diğerinde ise eşanjör çıkışı sıcak sudur ve geri besleme suyu olarak sisteme verilir.



**Şekil 3.5. Karşı Basıncılı Çok Kademeli Türbin Sisteminde Buhar Çıkışı Eşanjör Kullanımı**

Şekil 3.5. te eşanjöre verilen buharın sıcaklığı artırılıp yoğuşturucuya verilir. Böylece geri besleme suyu sıcak elde edilir. (  $T4 > T3 > T2 > T1$  )

Şekil 3.6. da eşanjörden çıkan sıcak su geri besleme suyuna katılarak geri besleme suyunun sıcaklığı artırılır.( $T_4 > T_3 > T_2 > T_1$ )



Şekil 3.6. Karşı Basıncılı Çok Kademeli Türbin Sisteminde Sıcak Su Çıkışlı Eşanjör Kullanılacağı Durum

### 3.2. Tek Boyutlu Sistemden Bileşik Isı-Güç Üretim Sistemine Geçiş

Bu tip tek boyutlu santrallerde yakıttan yüksek sıcaklık ve basınçta elde edilen buhar, bir türbine gönderilmek suretiyle elektrik üretimi sağlanmaktadır. En verimli

santrallerde bile yakıt enerjisinin çoğu zaman % 40'dan daha azı elektrik enerjisine çevrilebilmektedir. Geri kalan enerji kaybolmaktadır.

Buharın yoğuşturulması sırasında soğutma suyuna verilen enerjiden yararlanılmaya çalışılmalıdır. Bu atık ısıdan faydalanılabılır. Isı miktarı çok yüksek olmasına rağmen ilave olarak elektrik üretmek için sıcaklık çok düşüktür.

Birçok ticari endüstriyel uygulamada düşük sıcaklıkta proses buharına da ihtiyaç vardır. Bu nedenle elektrik ve ısının kombine üretimi ile, tek boyutlu sistemlerde atılmakta olan bu ısının, sanayi tesislerinde ve büyük yerleşim alanlarında kullanılması uygundur. Atık ısının değerlendirilmesi sonucunda sistemin verimi arttırılmaktadır. Bileşik ısı-güç santralleri ile toplam verimin % 80-85 dolaylarına çıkarılması mümkündür.

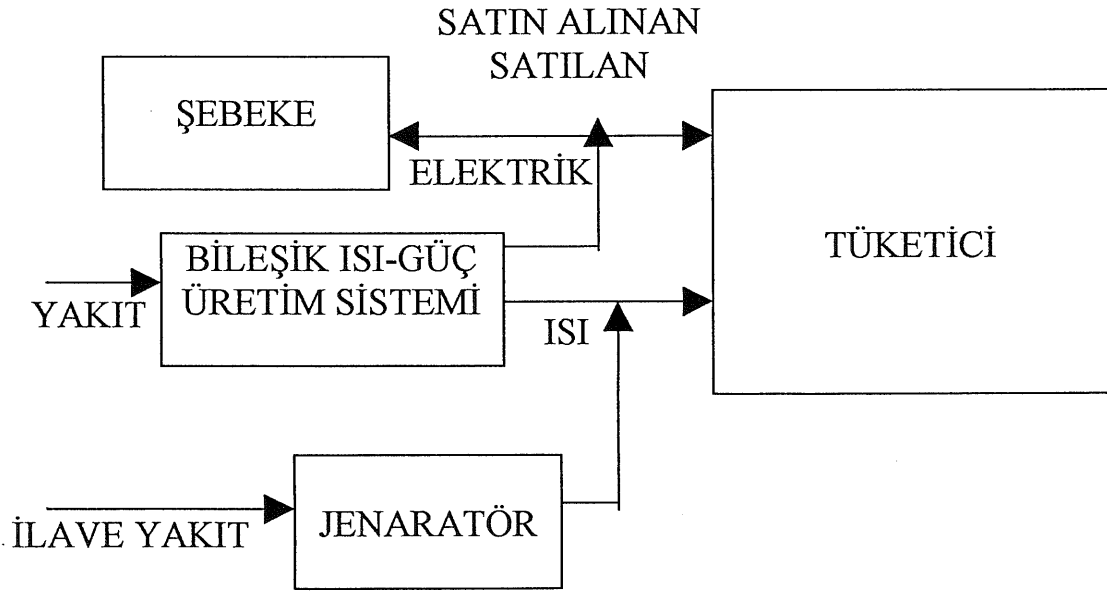
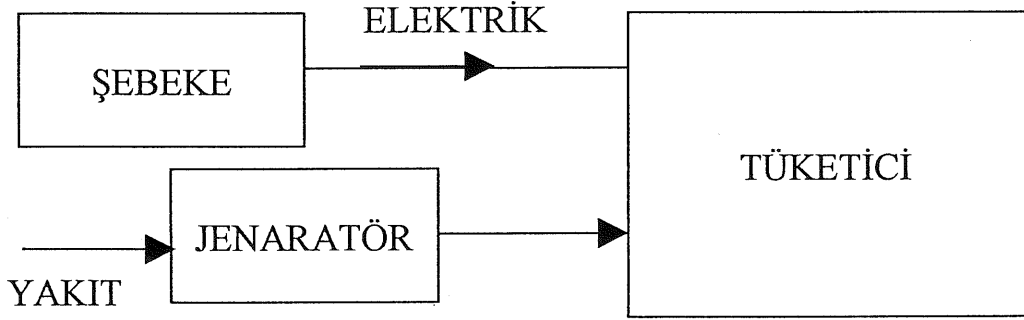
Isı ve elektriğin bu şekilde tek bir merkezde üretilmesinin, yüksek oranlarda enerji tasarrufu sağlaması nedeniyle, üretim proseslerinde değişiklik yapılmaksızın enerji maliyetlerinde önemli düşümlere imkan vermektedir.

Bileşik ısı-güç üretimi tesisi kurulmasının amacı; ısı ve elektrik talebinin bir bütün olarak tek bir merkezden karşılanma isteğidir. Bununla birlikte, elektrik enerjisinin talebinin artması halinde dışarıdan elektrik satın alınabilmesi ve tesis tarafında üretilen elektriğin talepten fazla olması durumunda da dışarıya elektrik satılabilmesi için sistem, konvansiyonel elektrik (enterkonnekte sistem) şebekesi ile uyumlu olmalıdır. Bu durum Şekil 3.7.'de gösterilmiştir.

Şekil-3.8.'de tek boyutlu sistemlerde güç üretimi için ideal sıcaklık-entropi diyagramı gösterilmiştir. Bu diyagramda 1'den 2'ye ısı verilir, 2'den 3'e türbinden iş elde edilir, 3'ten 4'e kondenserde ısı atılır. Verim % 34-43 arasındadır.

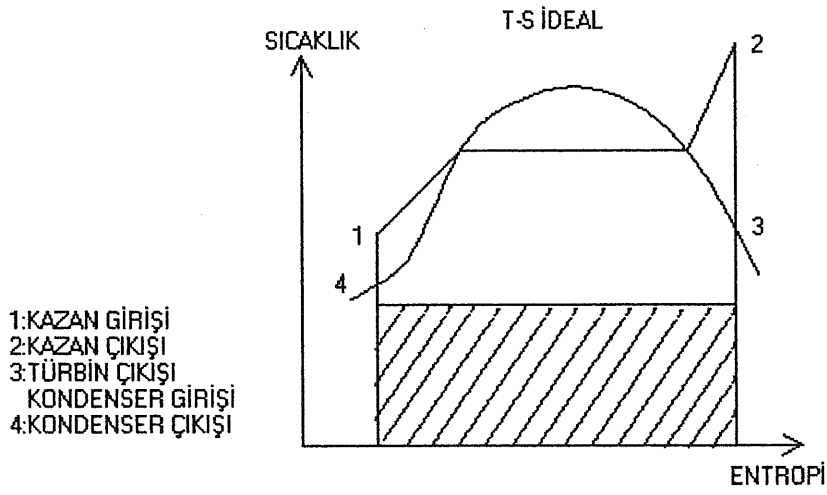
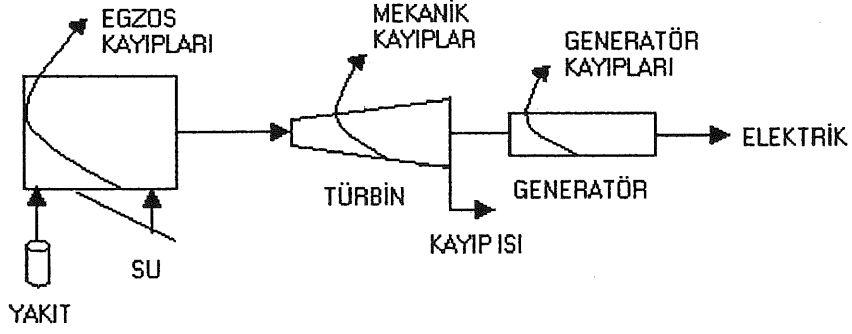
Şekil-3.9.'de bileşik ısı- güç sistemleri için sıcaklık-entropi diyagramı gösterilmiştir. Burada kondenserdeki büyük kayıplar olmadığı için verim % 70-80 dolaylarına yükselir.

## TEK BOYUTLU SİSTEM



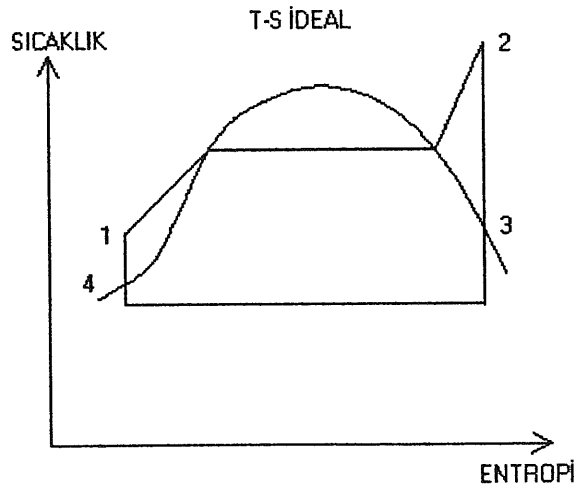
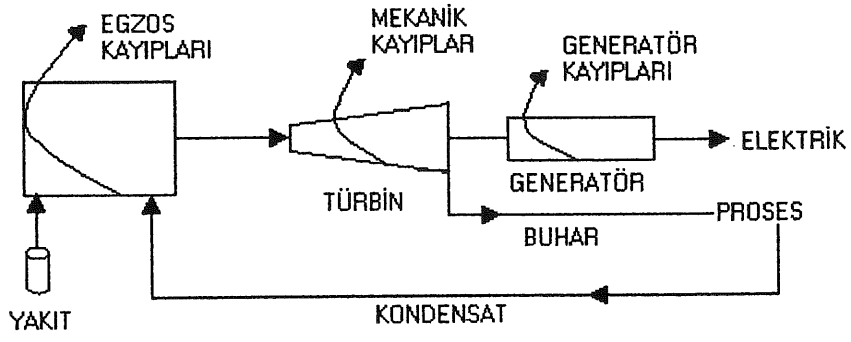
## BİLEŞİK ISI-GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİ

Şekil 3.7. Tek Boyutlu Sistem ile Bileşik Isı-Güç Sistemlerinin Enerji Sağlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması



Şekil 3.8. Tek Boyutlu Sistemlerde Sıcaklık- Entropi Diyagramı





Şekil 3.9. Bileşik Isı- Güç Sistemlerinde Sıcaklık – Entropi Diyagramı

### 3.3. Atılan Isının Yararlı Kullanılış Alanları

Atılan ısının uygulama alanını saptamaya en önemli parametre düşük ve yüksek nitelikli; bir başka deyişle düşük veya yüksek sıcaklıkta olmasına bağlıdır (Kıcımın 1997).

#### a) Düşük Nitelikli Atık Isı Uygulaması

Kondenserden geçirilen atık ısı

- Isıtmada
- Tarımda ( sıcak su, soğuk sulama suyuna katılarak bitkilerin çok soğuk sudan göreceği zarar önlenir.
- Seraların ısıtılması
- Tavukçulukta; binaların ısıtılmasında kullanılır.

#### b) Yüksek Nitelikli Atık Su Uygulaması

Buhar veya sıcak su halinde olabilir.

- Endüstriyel proses ısısı olarak
- Kentlerin merkezi ısıtılmaları ve klima tesisleri için
- Atık arıtmada
- Su damıtılmasında kullanılır

### 3.4.Sistemin Verimi

Elektrik ve ısısın ayrı ayrı üretildiği sistemlerde birim toplam enerji çıkışı başına sisteme girecek yakıt-(ısı enerjisi) miktarı ;

$$\frac{e}{\eta_e} + \frac{(1-e)}{\eta_h} \quad (3.1)$$

olur. Bu denklemde ;

$e$  : Toplam enerji çıkışının elektriğe ait olan kısmını göstermektedir.

Bu değer ( $e$ ) aşağıdaki gibi verilebilir,

$$e = \frac{E}{(E + \Delta H_s)} \quad (3.2)$$

Burada

$E$  : Üretilen elektrik enerjisini ;

$\Delta H_s$  : Sisteme verilen ısı enerjisini (bu değer, işleme giden buharın entalpisi ile işlemden dönen yoğuşmuş buharın entalpisi arasındaki farka eşittir.)

$\eta_e$  : Elektrik santrali verimi ;

$\eta_h$  : Kazan verimini

göstermektedir .

Yukarıdaki veriler ışığında ayrı ayrı enerji üretiminde birleşik verim;

$$\eta_A = \frac{1}{\left(\frac{e}{\eta_e} + \frac{(1-e)}{\eta_h}\right)} \quad (3.3)$$

$\eta_A$  : Ayrı ayrı enerji üretiminde birleşik verim olacaktır.

Ayrı ayrı enerji üretiminin veriminin düşük olmasının nedeni çıkış buharı olarak atılan çürük buharın kullanılmamasıdır. Birleşik ısı- güç üretiminin gerçekleştirilmesiyle sistemin toplam verimi %85-90 mertebesine yükseltilebilmiştir.

Verimin bu kadar yükseltilebilmesinin nedeni, çıkış buharının çok düşük sıcaklık ve basınca düşürülmeden, birkaç yüz derece sıcaklıkta, buhar türbininin ara kademelerinden alınarak, türbinde buhar enerjisinden daha az yararlanılmakla beraber çıkış buharının tam olarak değerlendirilebilmesidir.

Şu halde birleşik ısı- güç sisteminin verimi

$$\eta_B = \frac{(E + \Delta H_s)}{Q_A} \quad (3.4)$$

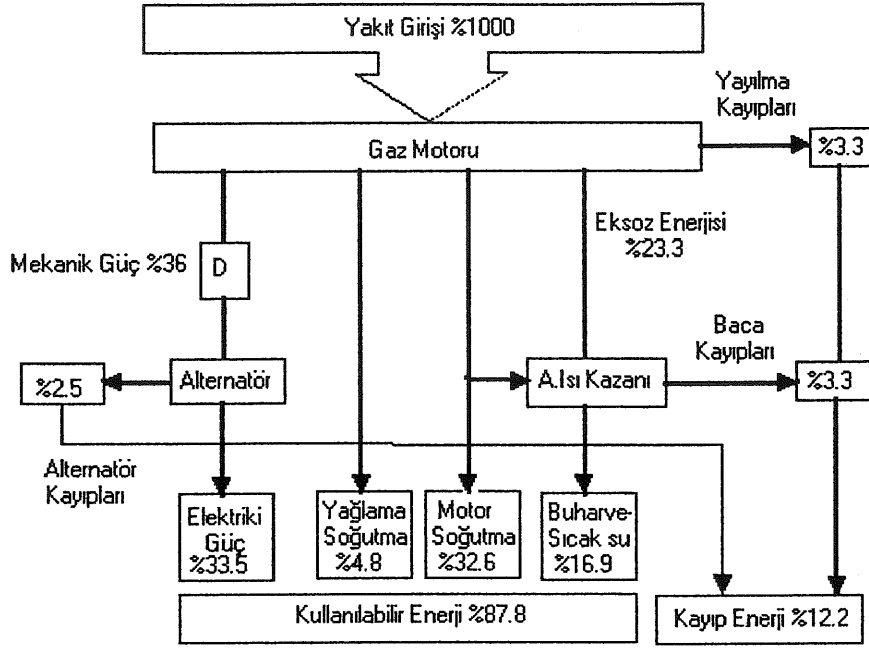
şeklinde olup, burada:

$Q_A$  : Sisteme giren yakıt ısısı ,

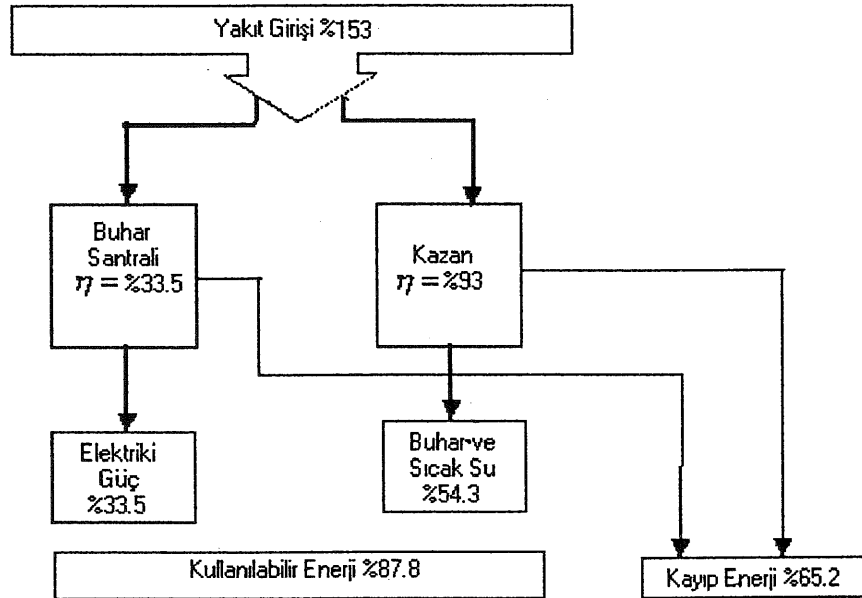
$\eta_B$  : Birleşik ısı- güç üretiminin verimi ,

olarak ifade edilebilir.

Yukarıda açıklaması yapılan bu iki durumun daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 3.10 ve Şekil 3.11. in değerlendirilmesi yararlı olacaktır. İhtiyaç duyduğu elektrik enerjisini ve buharı temin etmek hususunda iki seçeneği olan bir endüstriyel tesisin elektrik enerjisini ,%35 verimle elektrik üreten bir şebeke santralinden ve buharı da %94 verimle çalışan bir buhar kazanından, ya da elektrik ve ısı enerjisini eş zamanlı olarak, %33.5 elektrik, %54.3 ısı verime sahip bir birleşik ısı- güç üretiminin sağlandığı varsayalım.



Şekil 3.10. Isı ve Elektrik Beraber Üretilmesi



Şekil 3.11. Buhar ve Elektrik Ayrı Ayrı Üretilmesi

giriş enerjisinden sağlanan ekonomiklik ,

$$\frac{(153 - 100)}{153} * 100 = \%34.6 \quad (3.5)$$

olarak bulunabilir.

Enerji kaynağı bakımından birleşik ısı- güç sistemi, elektrik ve ısının ayrı ayrı üretildiği sisteme göre, birincil enerji kullanımında tasarruf sağlıyorsa faydalıdır. Yukarıda giriş enerjisinde giriş enerjisinde %34.6 'lık bir ekonomiklik elde edilmekte, daha az kullanım ile çevresel atık oluşumunu daha da azaltmaktadır (Alboyacı 1998).

## BÖLÜM 4

### BİLEŞİK ISI-GÜÇ ÜRETİMİ TÜRLERİ

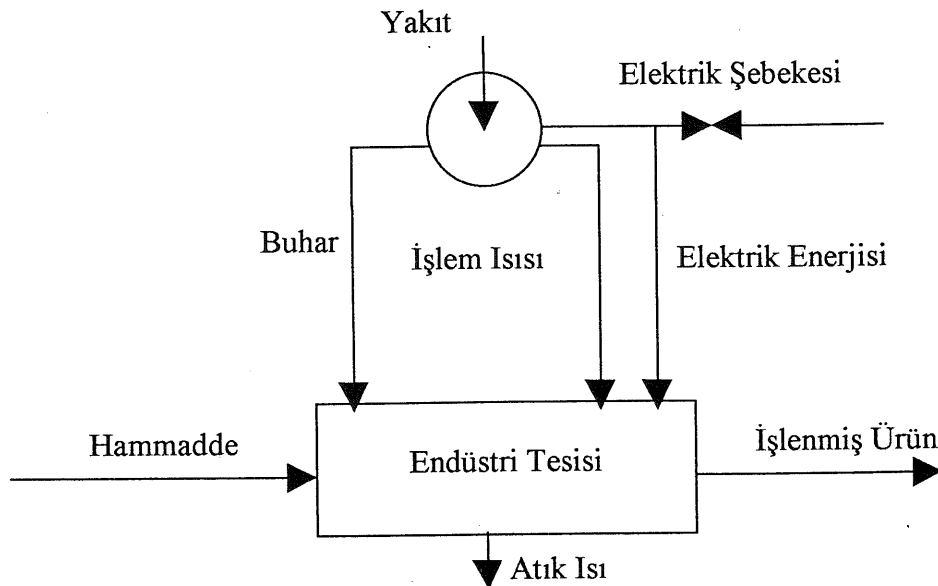
#### 4.1. Alt ve Üst Çevrimli Türler

Sistemden istenilenlere göre iki farklı çevrim tipi vardır. Sistemde ihtiyaç duyulan ana ürün elektrik veya ısı olabilir. Eğer elektrik enerjisi birinci planda ise sistem üst çevrimli türdedir, ısı enerjisi birinci planda ise sistem alt çevrimli türdedir.

##### 4.1.1. Üst çevrimli türler

Bu sistemlerde üretilen elektrik enerjisi birinci plandadır ve önce elektrik enerjisi üretilir. Geri kalan atık ısı ısı işlemlerde kullanılır.(Şekil 4.1.)

Burada yakıt, öncelikle elektrik ya da mil gücü üretmek amacıyla kullanılır. Elektrik enerjisi üretiminden geri kalan atık ısı enerjisi ise, ısı işlemlerde kullanılabilecek kadar yeterli yüksek kalitede olduğundan, endüstriyel işleme gönderilerek endüstri tesisinin ısı ihtiyacı karşılanmaktadır. Tesisin ısı ihtiyacının fazla olması durumunda yardımcı bir kazana ihtiyaç duyulabilir.



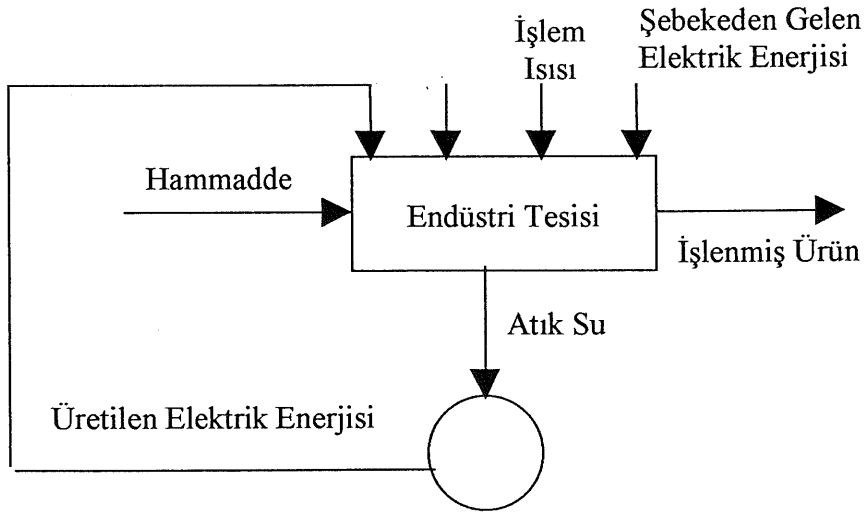
Şekil 4.1. Üst Çevrimli Birleşik Isı - Güç Üretim Sistemleri

#### 4.1.2. Alt çevirimli türler

Birinci amaç tesisin ısı ihtiyacını karşılamaktır. Yakılan yakıttan elde edilen ısı enerjisi tesiste kullanılır, kullanımdan arta kalan ısı türbine gönderilerek elektrik enerjisi elde edilir.(Şekil 4.2.)

Bu çevrimde düşük verimle elektrik enerjisi üretilir. Çünkü üretmek için, şebeke termik santrallerinde olduğu gibi kondenserli buhar türbini kullanılır. Buhar türbininden çıkan atık ısı kondenserde harcanacağından verim düşük olur.

Alt çevirim uygulaması, yüksek sıcaklıklar gerektiren çimento fırınlarının kullanıldığı çimento endüstrisinde ve cam endüstrisinde görülmektedir.



Şekil 4.2. Alt Çevrimli Birleşik Isı-Güç Üretim Sistemleri

#### 4.2. Buhar Türbinli Sistemler

Buhar kazanında yakıtın yanmasıyla açığa çıkan enerji suyu buharlaştırır. Daha sonra elde edilen buhar, buhar türbininde genişler ve türbinde üretilen mekanik enerji alternatörle elektrik enerjisine çevrilir. Türbin çıkışındaki atık ısı ise bir endüstriyel işleme gönderilerek birincil enerjinin daha verimli biçimde kullanımı sağlanmaktadır.



Buhar üretiminde doğal gaz, fuel-oil, kömürün yanı sıra çöp ve LPG(Likid Petol Gazı)'de yakıt olarak kullanılır.

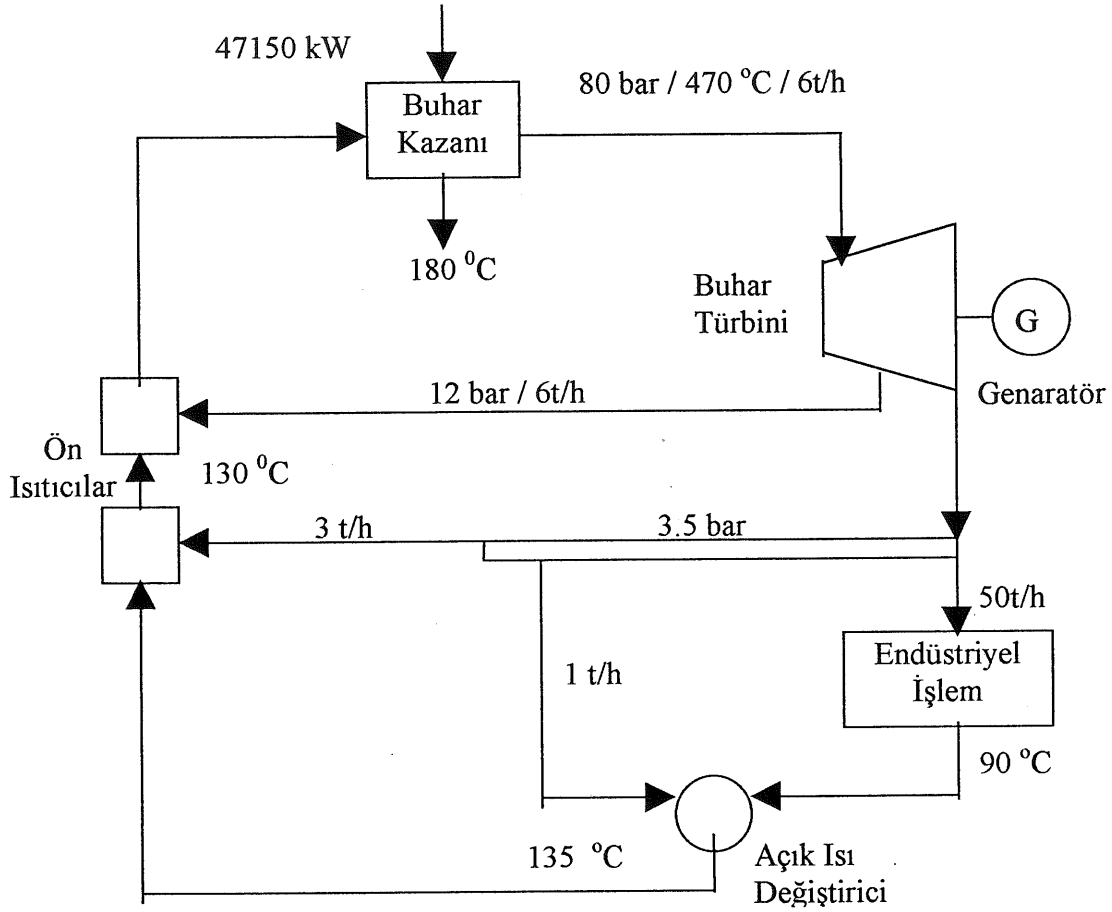
#### 4.2.1.Karşı basınç türbinli bileşik ısı-güç üretim sistemi (Kondensersiz çevrim)

Karşı basınç türbininde buhar, endüstriyel prosesin buhar ihtiyacına bağlı olarak belirli bir basınç seviyesine kadar genleşir. Türbinde üretilen mekanik güç elektrığe çevrilirken kalan buhar değişik proseslerde kullanılır. Proses buharının basınç seviyesi, buhar türbinindeki entalpi düşünü doğrudan etkilediğinden, tasarımda önemli bir parametredir. Proses için gerekli buharın basıncı yükseldikçe, üretilen elektrik miktarı azalır. Dolayısıyla elektrik üretebilmek için ısı yükü gerekmektedir.

Türbin girişindeki buhar basıncının hangi değerde olacağı, istenen elektrik gücü ihtiyacına bağlıdır. Karşı basınç yükseldikçe, yeterli miktarda elektrik enerjisi üretmek için türbin giriş basıncının ( aktif buhar basıncı ) da yükselmesi gerekir. Bu ise buharı üreten kazanın yatırım maliyetinin artması demektir (Milli Komite 1978)(Yücel 1978).

**Tablo 4.1.** Aktif Buhar Basınç Seviyelerine ve Miktarlarına Göre Elektrik Enerjisi Üretimi

Sıcaklık ve Basınç	Elektriksel Güç (MW)				Geri Basınç
	Aktif Buhar Miktarları (ton/h)				
	50	100	150	200	
50 bar, 450 C	4	8	12	16.5	12 bar
80 bar, 500 C	5.7	11	17	22.5	6.3 12 bar
115 bar, 525 C	12	18	26		12 bar
50 bar, 450 C	6	13	19	24	6 bar
80 bar, 500 C	7	14	22	30	6 bar
115 bar, 525 C	8	15.5	24	33	6 bar

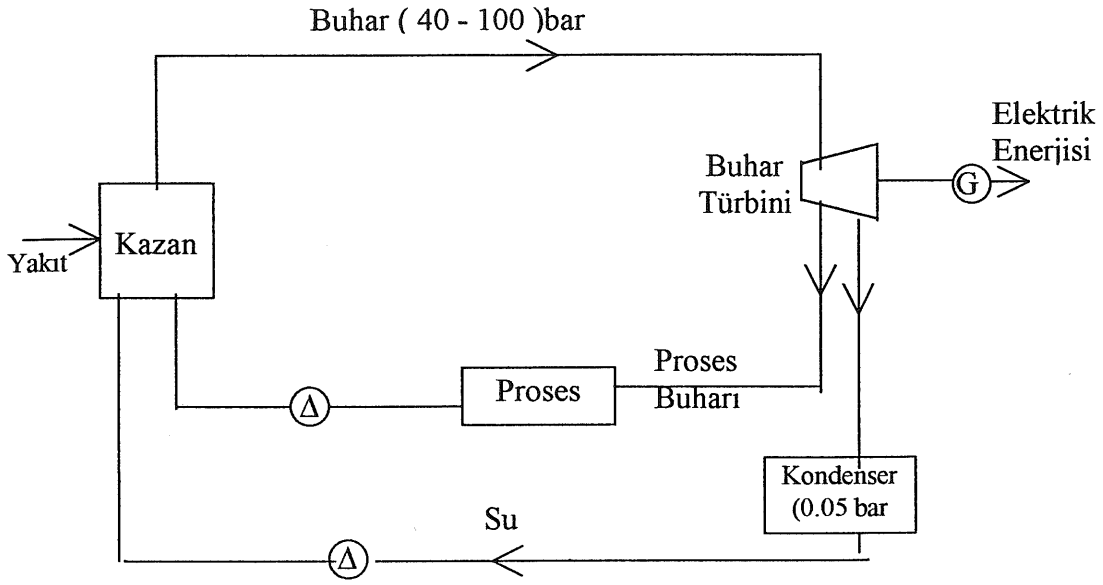


Şekil 4.3. Buhar Türbinli ve Kondensersiz Birleşik Isı-Güç Üretim Sisteminin Çevrimi

#### 4.2.2. Yoğuşma / Ekstraksiyon türbinli (Ara buhar çekilen) bileşik ısı-güç üretim sistemi (Kondenserli çevrim)

Karşı basınçlı türbinde buharın tamamı belirli bir basınç seviyesine kadar genişir. Fakat yoğuşma / ekstraksiyon türbininde, buharın bir bölümü proses ihtiyaçlarını karşılamak üzere gereken basınç ve sıcaklıkta türbinden alınırken, geri kalan buhar 0,05 bar düşük basınca kadar genişir ve türbini çevirir.(Şekil 4.4.)

Üretilen elektriksel gücün, endüstriyel tesisin ihtiyacını karşılamadığı durumlarda kondenserli bu tip çevrime başvurulur. Burada, kondenserde kaybolan ısı gözönüne alınırsa, kondensersiz çevrimden daha az verim elde edilir (Milli Komite 1978)(Yücel 1978).



**Şekil 4.4.** Buhar Türbinli ve Kondenserli Bileşik Isı-Güç Üretim Sistemi

Kondenserli güç üretimi kondensersiz üretim kadar verimli olmamasına rağmen, ekonomikliği birçok endüstriyel uygulamalarda görülmüştür. Bu ekonomikliğin nedeni; çoğunlukla kondenserli üretilen gücün, şebekeden elektrik enerjisi alımını kontrol etmek (azaltmak) için kullanıldığı,

- Odun, kömür, çöp gibi düşük maliyetli yakıtların kullanılabilirdiği,
- Elektrik kesintisinin büyük zarara yol açabileceği,
- Şebekeye enerji satışının elverişli hale geldiği (özellikle düşük yakıt maliyeti nedeniyle), işletmelerde görülmektedir.

Bileşik ısı-güç sistemi için buhar türbinli üç ayrı sistem verilmektedir.

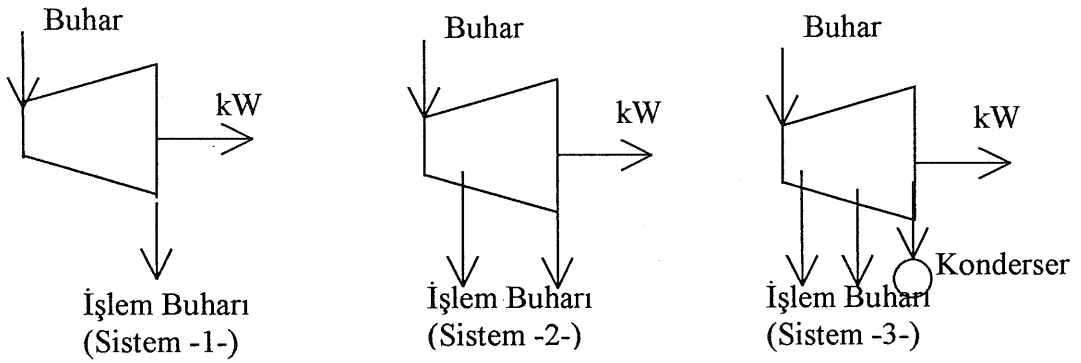
1) Sistem, endüstriyel işleme tek bir basınç düzeyinde buhar sağlamakta olup burada karşı basınçlı bir türbin kullanılır.

2) Sistemde, işleme iki farklı basınçta buhar sağlanmakta olup, yüksek sıcaklıktaki buhar, türbinin orta kısmından, daha alçak basınçlı buhar ise türbinin sonundan alınır. Burada kullanılan türbin ara buhar olmalı ve karşı basınçlı bir türbindir.

3) Sistemde, ek güç çıkışı sağlamak üzere kondenserde genleşen buharın yanında, iki farklı basınçta buhar üretilir. Buradaki türbin ara buhar almalı kondenserli bir türbindir.

Şekil 4.5. teki türbin sistemleri gözönüne alınırsa:

1. ve 2. Sistem kondenserli olmadıkları için endüstriyel işlemin buhar ihtiyacına bağlı olarak güç üretilir. 3. Sistemde güç, işlem buharı gereksiniminden bağımsız olarak üretilebilir.



Şekil 4.5. Buhar Türbin Çeşitleri

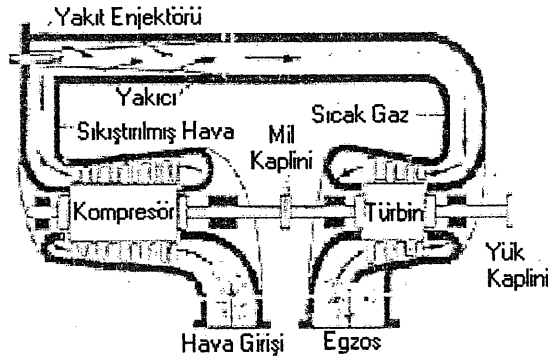
#### 4.3. Gaz Türbinli Sistemler

Gaz türbinli bir tesisin üç önemli elemanı vardır:

- Kompresör (KP)
- Yanma Odası (YO) (reaktör)
- Türbin

Ortam havası kompresör tarafından emilir ve sıkıştırılır. Bu sırada havanın sıcaklığı da yükselir. 150 °C civarındaki bu kızgın hava yanma odasına (reaktöre) gelir. Diğer yandan yanma odasına yüksek basınçlı yakıt (doğal gaz, LPG, motorin) püskürtülür.

Yanma sonucunda yüksek basınçlı ve 900 °C ile 1200 °C sıcaklığında egzost gazı açığa çıkar. Bu gaz, türbinden geçerken türbinin kanatçıklarına çarparak dönmeye neden olur. Böylece kompresör ile türbin arasındaki şaft da dönmeye başlar. Üretilen gücün %65'i kompresörü çevirmek için kullanılır , kalanı mekanik şaft gücüdür. Türbinden çıkan egzost gazının sıcaklığı 400 °C - 600 °C'ye düşmüştür. Bu gaz, bir atık ısı kazanı (ısı değiştirici) yardımıyla istenen şartlarda kızgın buhar veya sıcak su elde edilir. Geri kazanılan ısı 80°C de sıcak su veya 10 bar basınçta buhar olarak kullanılır. Bu tip kojenarasyon sisteminde verim, % 70-80 arasındadır. Üretilen elektrik miktarı ortamın sıcaklık ve basıncıyla yakından ilgilidir. Gaz türbinlerinin verimi 40°C nin üzerinde %15-20 kadar düşer (Gaz Türbini 1997).



Şekil 4.6. Gaz Türbini Prensip Şeması

Gaz türbinli bileşik ısı-güç sisteminin buhar türbinli bileşik ısı-güç sistemine göre üstünlükleri şunlardır:

- Daha ucuzdur
- Verimi daha yüksektir
- Devreye giriş süreleri daha kısadır
- Kapladığı alan daha küçüktür
- Montaj ve tesis süresi daha kısadır
- Enerji üretimi ile ısı üretimi oranları isteğe bağlı değiştirilebilir
- Yüksek güvenilirlikte çalışır

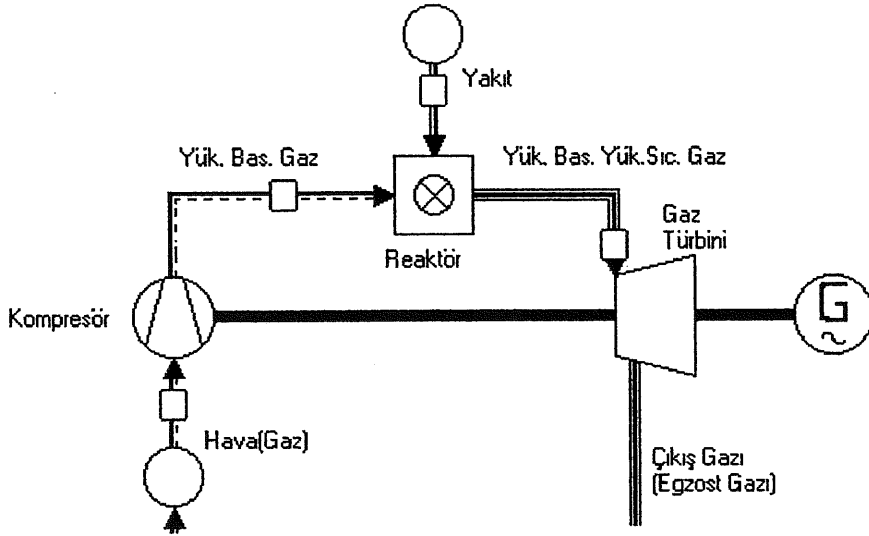
Gaz türbinli bileşik ısı-güç üretimi sistemleri genellikle gıda, süt ürünleri, petrokimya, tekstil, kağıt ve kağıt hamuru gibi endüstriyel sektörlerde kullanılır.

### 4.3.1.Çevrim açısından gaz türbinli sistemler

Çevrim açısından gaz türbinli sistemler ikiye ayrılır. Bunlar: açık çevrim ve kapalı çevrimdir. Açık çevrimde çıkış gazı atıktır. Kapalı çevrimde ise girişte kompresöre verilen gaz çevrim işleminden sonra tekrar kullanılır. Böylece verim de artırılmış olur.

#### 4.3.1.1.Açık çevrimli sistemler

Şekil 4.7. de gaz türbinli sistemin açık çevrimine ilişkin model verilmektedir.



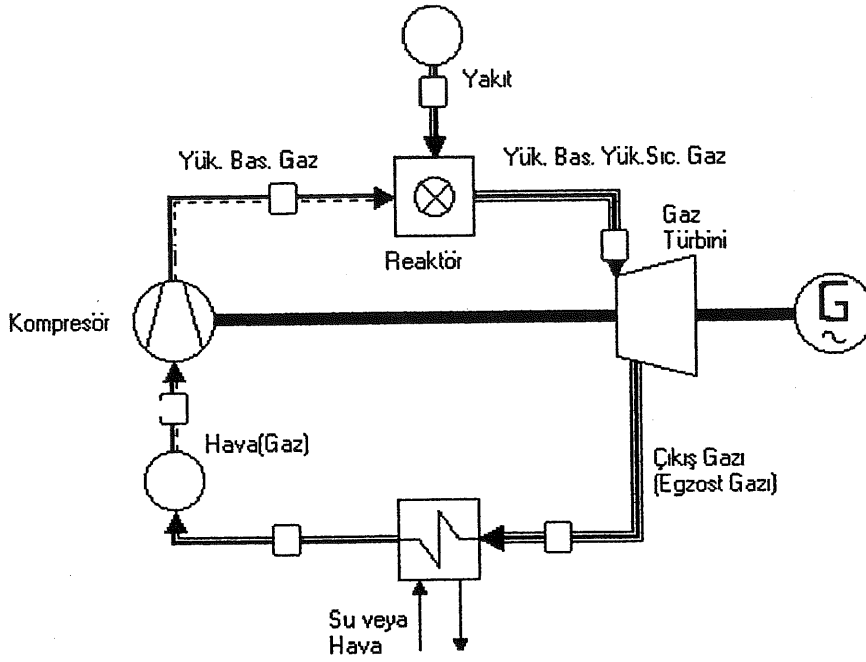
Şekil 4.7. Açık Çevrimli Gaz Türbinli Sistem

Kompresöre verilen hava sıkıştırılıp sıcaklığı yükseltilir. Bu yüksek basınçlı buhar reaktöre gönderilir. Reaktöre yakıt püskürtülerek yanma sağlanır ve gazın sıcaklığı artırılır. Çıkan gaz türbine verilir. Türbinden çıkan gaz serbest bırakılır.

#### 4.3.1.2.Kapalı çevrimli sistemler

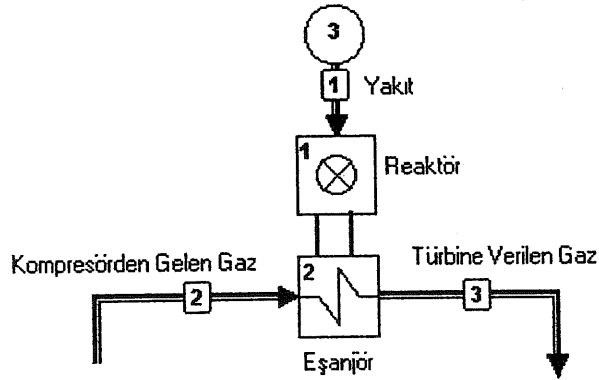
Şekil 4.8. de görüldüğü gibi çıkış gazı, tekrar kompresörde kullanılır hale getirilmiş

olur. Kapalı olduğu için çevre kirliliği olmaz ve verim de artırılmış olur.



Şekil 4.8. Kapalı Çevrimli Gaz Türbinli Sistem

Kapalı çevrim olduğu için başka gazlar da kullanılabilir. Örneğin, karbondioksit, helyum, hidrojen. Fakat, tehlikeli gazlar kullanıldığında endirekt yöntemli reaktörlerin kullanılması daha güvenirlidir (Şekil 4.9.).



Şekil 4.9. Eşanjör ve Reaktör Kullanılan Yanma Odası

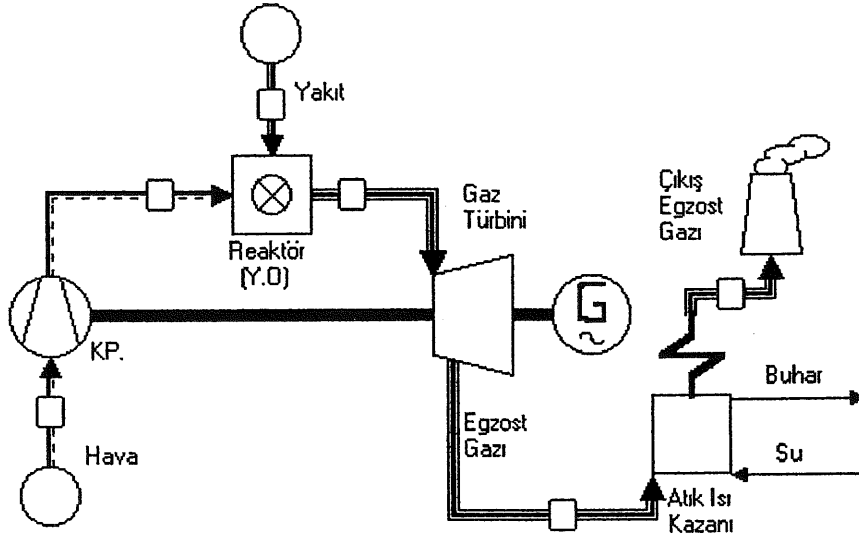
Yakıtın yakıldığı yerden (reaktörden) ısı enerjisi eşanjöre aktarılır. Kompresörden gelen gaz yanma odasında (reaktörde) değil eşanjörde ısıtılır.

### 4.3.2. Atık ısı kazanı kullanılan sistemler

Atık egzost gazının en etkin ve yaygın kullanımı, atık ısı kazanları ile buhar üretmektir.

#### 4.3.2.1. Ateşlemesiz atık ısı kazanlı sistemler

Sadece gaz türbinini egzostundaki enerji kullanılarak buhar üretilir. Üretilen buhar miktarı kullanılan yakıt ve basınca bağlı olarak değişir. Buhar basıncı düşükçe kullanılan buhar miktarı artar.



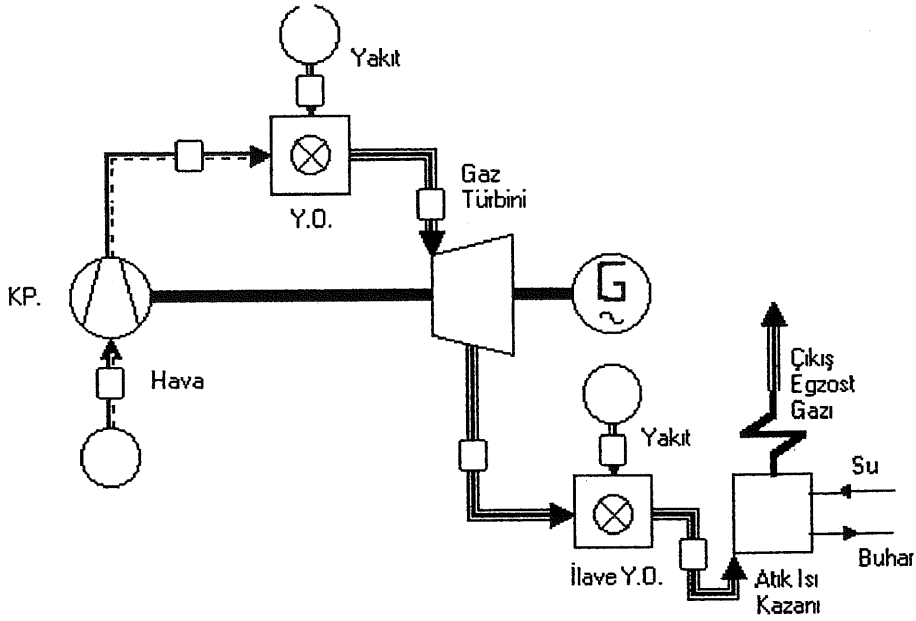
Şekil 4.10. Ateşlemesiz Atık Isı Kazanlı Sistem

Şekil 4.10 da görüldüğü gibi türbinden çıkan sıcak gazlar bir atık ısı kazanına girerek endüstriyel proses uygulaması ve alan ısıtması için buhar üretirler ya da direkt olarak proses uygulamasında kullanılırlar.



#### 4.3.2.2. İlave ateşlemeli atık ısı kazanlı sistemler

Gaz türbininden çıkan egzost gazının sıcaklığını yükseltmek amacıyla ilave yakıt kullanılır.



Şekil 4.11. İlave Ateşlemeli Atık Isı Kazanlı Sistem

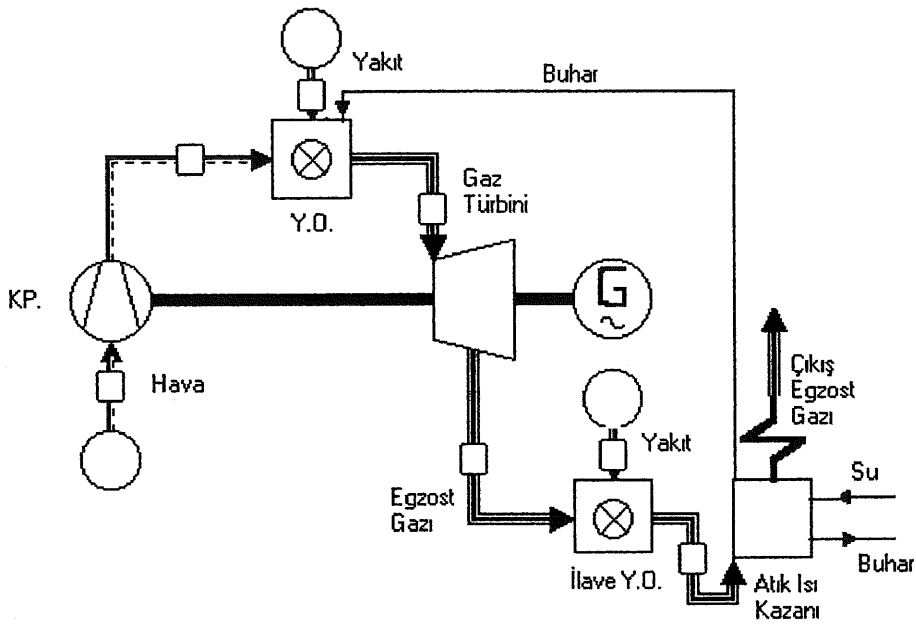
Gaz türbinlerinin egzost gazları yanma yapmaya yetecek kadar oksijen (ortalama % 15 O<sub>2</sub>) içerir. Şekil 4.11 de görüldüğü gibi türbinden çıkan egzost gazı, atık ısı kazanına girmeden ilave bir yanma odasında yakılarak gazın sıcaklığı ve basıncı artırılabilir. Böylece daha fazla buhar elde edilebilir. Böylece elektrik ve buhar bağımsız üretilebilir.

#### 4.3.3. Buhar enjeksiyonlu gaz türbini

Elektrik üretimini artırmak için atık ısı kazanından elde edilen buharın bir kısmı gaz türbininin yanma odasına enjekte edilir (Şekil 4.12.).

Bu yöntemin faydaları şunlardır :

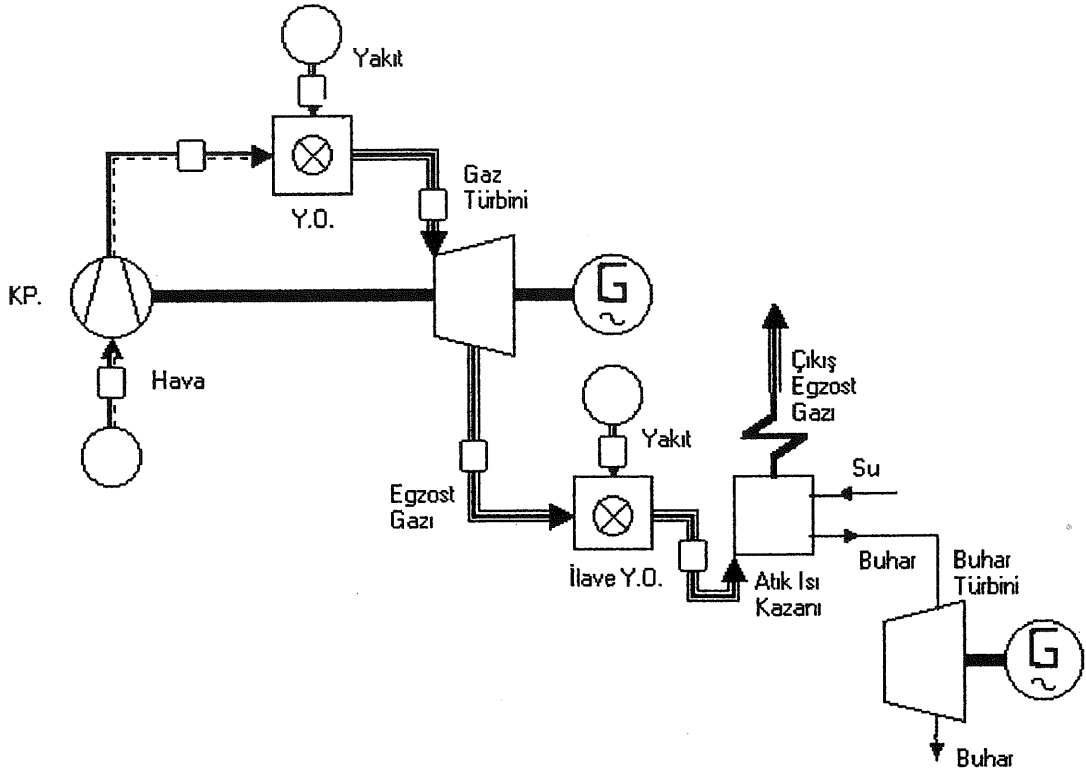
- Enjekte edilen buhar miktarı ayarlanabildiği için işletmenin ihtiyacına göre elektrik üretimi gerçekleştirilir. Burada kullanılan buhar miktarının hava miktarına oranı % 15 dolayındadır.
- Bu ek sistem elektrik üretimini % 60-80 oranında artırır.



Şekil 4.12. Buhar Enjeksiyonlu Çevrim Sistemi

#### 4.3.4. Gaz türbinli çevrimde buhar türbini kullanımı

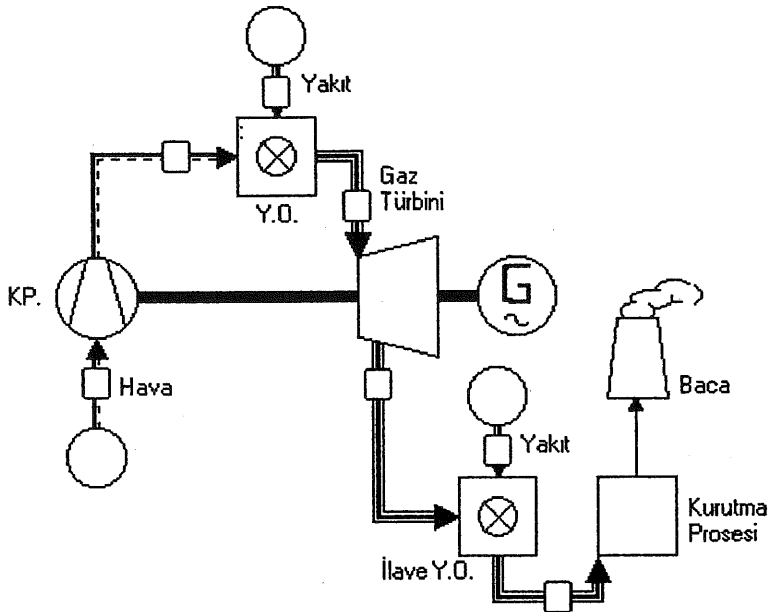
Egzost gazından yararlanarak ilave elektrik enerjisi üretilir. Şekil 4.13. teki sistemde gaz türbinini yanı sıra atık ısı kazanında üretilen buharı kullanan bir buhar türbini vardır. Bu sistemde buhar üretimi azalır, fakat elektrik üretimi artar. Buhar türbininden çıkan buharın basıncı ve ısısı düşer.



Şekil 4.13. Gaz Türbinli Sistemde Buhar Türbininin Kullanıldığı Sistem

#### 4.3.5. Egzost gazlarının doğrudan kullanıldığı gaz türbinli sistemler

Egzost gazlarının endüstriyel proseslerde doğrudan kullanılabilirliği de olur. Kurutma prosesi bu tip bir sistemdir. İlave yanma odası ile üretilen ısı miktarı ayarlanabilir.



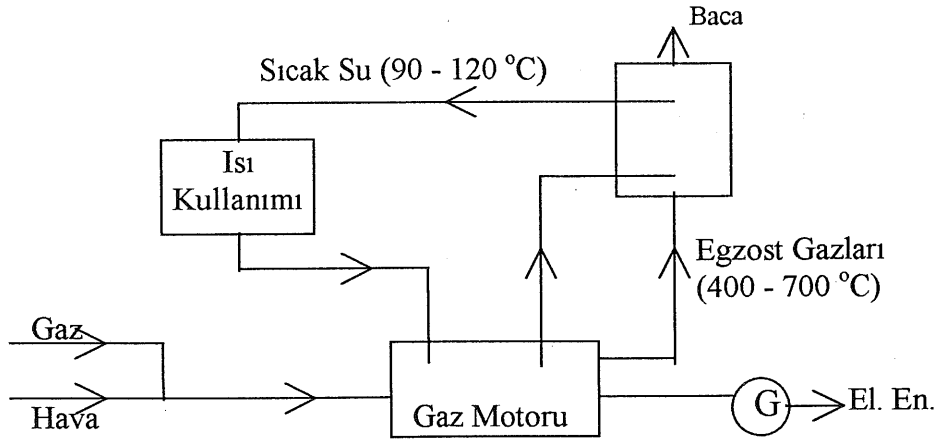
Şekil 4.14. Gaz Türbinli Sistemde Egzost Gazının Direkt Kullanımı

#### 4.4.İçten Yanmalı Motorlu Sistemler

Kombine ısı güç sistemlerinde kullanılan motorlar otomobillerde kullanılan benzin ve dizel motorlara benzeyen içten yanmalı motorlardır. Gaz ve dizel motorları içten yanmalı motorlardır.

##### 4.4.1. Gaz motorlu sistemler

Yakıt ve hava karışımı karbüratörde karıştırılarak sıkıştırılır. Sıkıştırılan karışım buji vasıtasıyla ateşlenir. Burada oluşan genişleme ile pistonlar ve buna bağlı olarak şaftta dönme hareketi oluşur. Elde edilen dönme hareketi ile ister bir jeneratör tahrik edilerek elektrik enerjisi üretilir, istenirse bu dönel hareket bir akışkanı pompalamak amacıyla pompayı tahrik etmek üzere kullanılır. Şekil 4.15 te bu sistemin elektrik ve ısı üretimi için kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Gaz Motorlu Bileşik Isı-Güç Üretim Sistem Çevrimi

Enerji dağılımında % 7-10 oranında görülen radyasyonla kaybolan ısıdan faydalanılması mümkün değildir. Geriye kalan % 50 oranındaki kayıptan faydalanarak toplam verim % 90'e çıkarılabilir.

Bir motorun ısı olarak kaybettiği enerjinin geri kazanılmasının en basit yolu, motorun radyatörü üzerinden sağlanan sıcak havanın değerlendirilmesidir. Motor

gövdesinden ve egzost ısı dönüştürücünden (eşanjörden) sıcak su sağlayan sistemlerle ısı, geri kazanılabilir.

Gaz motorları elektrik ihtiyacının yanı sıra ısıtma veya soğutma amaçlı ısı enerjisi gereksinimi duyulan, toplu konut bölgeleri, tatil köyleri, üniversite kampüsleri, hastaneler, yüzme havuzlu spor kompleksleri gibi uygulama alanlarında çok uygun çözümlerdir.

Sistemde doğal gaz, çöp gazı, arıtma tesisi gazı, kok gazı, sıvı gaz, biogaz, diesel veya kalorifer yakıtı kullanılabilir.

Böyle bir sistemden elde edilebilecek sıcaklık seviyeleri incelenirse;

- Egzost gazı makineyi 400 °C- 500° C sıcaklıkta terkeder.
- Çeşitli egzost-kaskatları ile sıcaklık seviyesinin 200 °C sıcaklıktaki işlem buharına dönüştürülebilir.
- Eğer egzost gazı ısı dönüştürücüsü sıcak sulu ısıtma çevrimine yönelik çalıştırılıyorsa, ısı dönüştürücüsünün su tarafının 90°C- 130 °C arasında sıcaklık seviyesine getirilebilir.
- Kullanılabilir motor soğutma suyu sıcaklık seviyesinin, normal soğutulan motorlarda 75°C - 90° C, kızgın soğutulan motorlarda 120 °C olur.
- Yağ soğutma ısı dönüştürücüleri ile su devresinde 60C °-75 °C'lik sıcaklık elde edilir.

Motordaki bu ısı kaynakları faydalı bir çevrimle kullanılabilir hale getirilebilir. Eğer ısıtma sistemi için gerekli sıcaklık seviyesi, motorun ısıtma çevrimi ile elde edilemiyorsa sisteme bağlanan bir kazan ile sıcaklık seviyesi daha yukarı çekilebilir. Atık ısısının kullanılmadığı durumlarda, motorun çalışmasını kesintiye uğratmamak için acil soğutma ısı dönüştürücüleri veya soğutma kuleleri ile ısı dışarı atılmalıdır. Fazla ısının atılması yerine bunun bir ısı deposunda depolanması daha verimli olmakta, diğer tarafta bu yolla ısı talebinin de yaklaşık olarak sabitleşmesi sağlanmaktadır.

Kojenerasyon sistemlerde gaz motoru kısa zamanda devreye alınıp yine kısa zamanda devre dışı bırakılır. Aynı zamanda, gaz motoru tesisinin az devre elemanı içermesinden dolayı diğer sistemlere göre daha kısa sürelerde tesis edilebilmesi ve iç tüketimlerinin az olması da gaz motorunun bir avantajıdır.(Turna 1994)

#### 4.4.2. Dizel motorlu sistemler

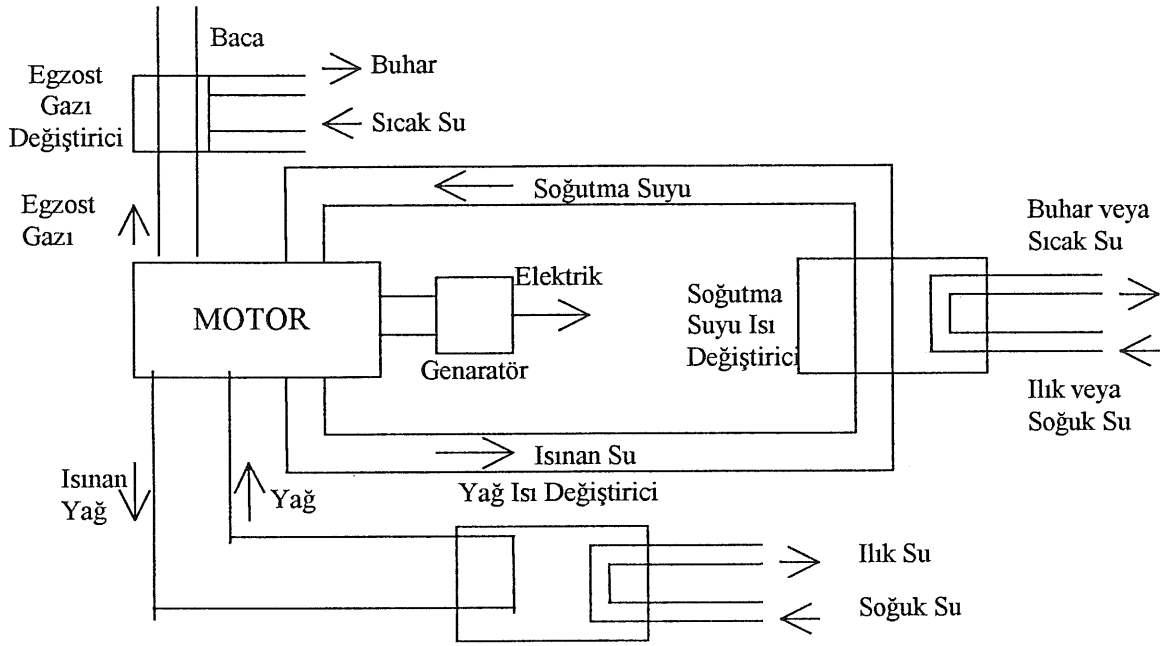
Dizel motorlarda enjeksiyon sistemlerde içten yanma sağlanır. Dizel motorlarda hava, yüksek basınçla sıkıştırılır. Sıkıştırılma sonucu sıcaklığı yükselen havanın içine yakıt enjekte edilerek ateşleme yapılır.

Dizel motorlu sistemler, kullanılan ilk bileşik santrallerdir. Doğal gazın kullanımının artmasıyla yeniden önem kazanmıştır. Doğal gaz ile çalışan motorların az bakım gerektirmesi, daha uzun ömürlü olması, egzost gazlarındaki atık ısının daha çok geri kazanılması iyi bir avantaj sağlamaktadır.

Dizel motorlarda yakıt olarak doğal gaz kullanılmaktadır. Toplam enerjinin % 95 - 99'u doğal gaz, % 1- 5'i ise dizel yakıtı ile sağlanmaktadır. 200-250 bar yüksek basınçtaki doğal gaz, dizel yakıt ile silindire basılmaktadır.

Egzost gazından atılan ve motorun soğutulmasından sonra radyatörle havaya atılan atık ısı enerjisini değerlendirerek sıcak su ve ya buhar elde edilir. Şekil 4.16. da bu sisteme ait bir modeldir.

Dizel motorları küçük ölçekli projelerin yanı sıra endüstriyel kojenerasyon projelerine de uygundur. Dizel motorun elektrik motorun elektrik verimi fazla olmasına rağmen ısı verimi o kadar yüksek değildir



Şekil 4.16. Dizel Motorlu Bileşik Isı-Güç Üretim Sistemi

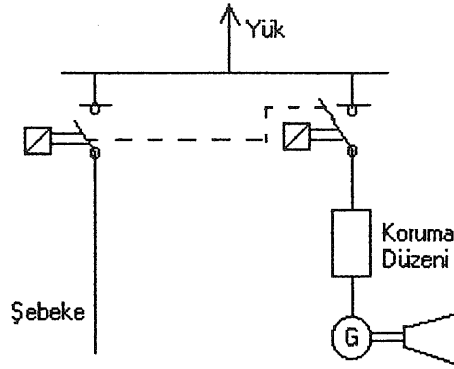
#### 4.4.3. İçten yanmalı motorlu santrallerin elektrik düzenleri

İçten yanmalı motorlu santrallerin elektrik düzenlerini iki bölümde ele alabiliriz. Bunlar: otomatik yolalma düzenleri ve senkronizasyon düzenleridir.

##### 4.4.3.1. Otomatik yolalma düzenleri

Otomatik yol alma düzenleri enerji kesintisinden otomatik olarak yol vermeyi sağlayan mikroişlemler ve açma kapama cihazlarıdır. Söz konusu mikroişlemler, enerji kesintisinden dizel motoru çalıştırır. Herhangi bir sebeple dizel motor çalışmadığında 2 defa daha çalıştırmayı dener, çalışmazsa uyarı sinyali verir.

Bu sistem özellikle şebekeyle veya birbirleriyle paralel çalışmayacak dizel sistemler için söz konusudur.



**Şekil 4.17.** İçten Yanmalı Motorlu Sistemin Otomatik Yolalma Düzeni

Şebeke ile içten yanmalı motor sistemi beraber çalışacaksa şalterler arası kilitleme yapılır(El-Wakil 1984).

Yedek enerji üretiminde sistem, şebekeyle beraber çalışmaz.

Şebeke enerjisi gelince mikroişlemci şebekenin enerjisinin süreklilik kazanmasını bekler. Daha sonra jeneratörün açma-kapama cihazını açıp şebekenin açma -kapama cihazını kapar.

#### 4.4.3.2. Senkronizasyon düzenleri

Şebeke ile paralel çalışma varsa veya birden fazla içten yanmalı motor sistemi varsa üniteler arası senkronizasyon sağlanmalıdır. İki elektriksel sistemin birbirleriyle paralel çalışması için senkronizasyon koşullarına uygun olmalıdır:

- 1) Gerilimlerin genlikleri aynı olmalı
- 2) Faz sırası aynı olmalı
- 3) Faz farkı olmamalı
- 4) Frekansları birbirleriyle aynı olmalı



Sanayi tesislerimizin hemen hemen büyük bir çoğunluğu 30 kV şebeke gerilimi hattı üzerinden beslenmektedir.

MW sınıfında üretim yapan gaz türbinli veya dizel motorlu santrallerin generatör çıkışları ise O.G. seviyesinde genelde 6,3 kV veya 11 kV olmaktadır. Dolayısıyla şebeke ile paralel çalışma imkanını yaratmak için bu gerilim önce bir yükseltici trafo ile şebeke gerilimine bağlı olarak 30 – 34,5 kV arasındaki bara gerilim seviyesine çıkarılır. Kullanıcı fabrikada 6,3 kV gerilim varsa generatör direk olarak 6,3 kV baraya bağlanabilmektedir.

Paralel çalışma sırasında , şebeke tarafından bir arıza olması durumunda veya şebeke gerilimi ve frekansı değerlerinde set edilen limitleri aşan bir dalgalanma olursa ve tek tarafında şebeke elektriği kesilirse vektör şift diye adlandırılan şebeke rölesi kuplaj kesicisini açarak şebekeyi baradan ayırır ve santral kesintisiz bir şekilde ada moduna geçerek barayı beslemeye devam eder.

Generatör üzerindeki korumalar ise şunlardır:

Aşırı akım, kısa devre, ters güç, diferansiyel röle, aşırı gerilim, toprak hatası , uyarma kayıpları, aşırı uyarma korumaları.

. Burada esas olan hem şebeke ile uyumlu şekilde paralel olarak çalışabilmek, hem de şebekede oluşan ve sistemi rahatsız edebilecek arızalarda kesintisiz bir şekilde ada moduna geçerek fabrikaya sürekli ve kaliteli elektriği sağlayabilmektir.

. Tipik bir iki türbinli kojenerasyon santrallerinin 34,5 kV şalt tesisini incelediğimizde dolap dizaynı Şekil 4.18 . deki gibidir. Bu dolapta şu hücreler bulunur:

Ayırıcılı giriş hücresi

2 adet tedaş hücre ölçüsü hücresi. Her hücrede tek bir sayaç hem enerji alış ve satışını hem de aktif ve reaktif enerjiyi gösterebilmektedir.

1 adet senkronizasyon ve kuplaj hücresi: Bu dolapta şebeke gerilimi ölçü referans trafoları şebekeyi santralden ayıran kesici bulunmaktadır.

1 adet bara ölçü hücresi

2 adet generatör trafoları besleme hücresi

1 adet santral binası için ihtiyaç trafosu besleme hücresi

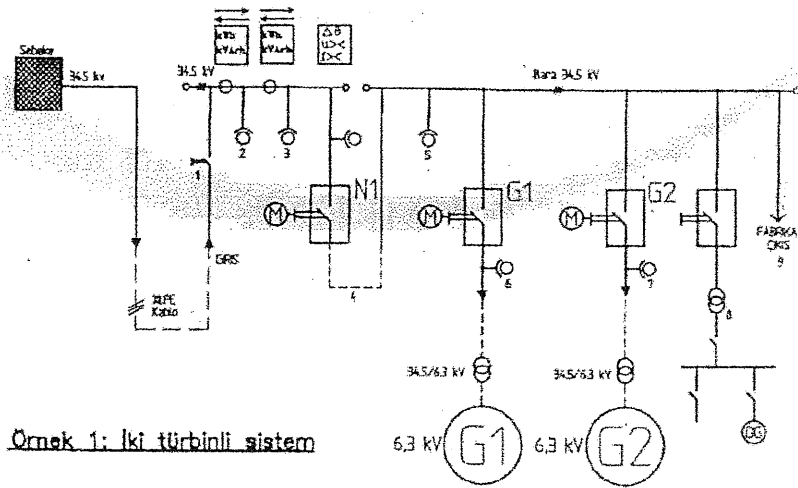
1 veya ihtiyaca göre yeterli sayıda çıkış hücreleri.

Şayet santralin kurulacağı fabrikadaki makineler aşırı derecede hassas makinelerse ve şebekedeki frekans / gerilim dalgalanmalarında santralin şebeke ile paralel kalması isteniyorsa sistemin önüne Şekil 4.19 da görüldüğü gibi ayarlı bir regeltrafo koyulabilir. Sistemde şebeke ile paralel girme veya generatörlerin birbirleriyle paralel çalışması için ihtiyaç duyulan gerilimler üç ayrı noktadan alınan gerilim referansları ile sağlanır. Bu noktalar :

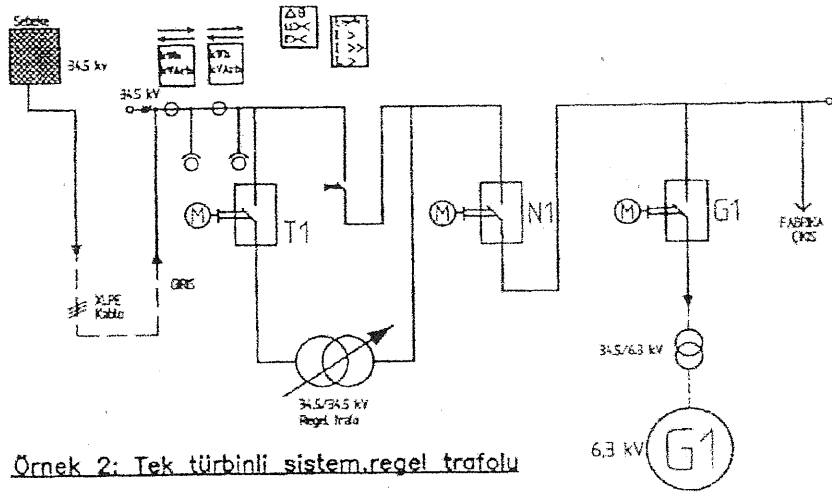
Kuplaj kesici önündeki gerilim trafoları(şebeke gerilimi)

Bara ölçü hücresindeki gerilim trafoları(generator gerilimi)

Trafo besleme hücresindeki gerilim trafoları(generator gerilimi) (Dural 1999)



Şekil 4.18. O.G. Kojenerasyon Şalt Tesisi (İki Türbinli Sistem)



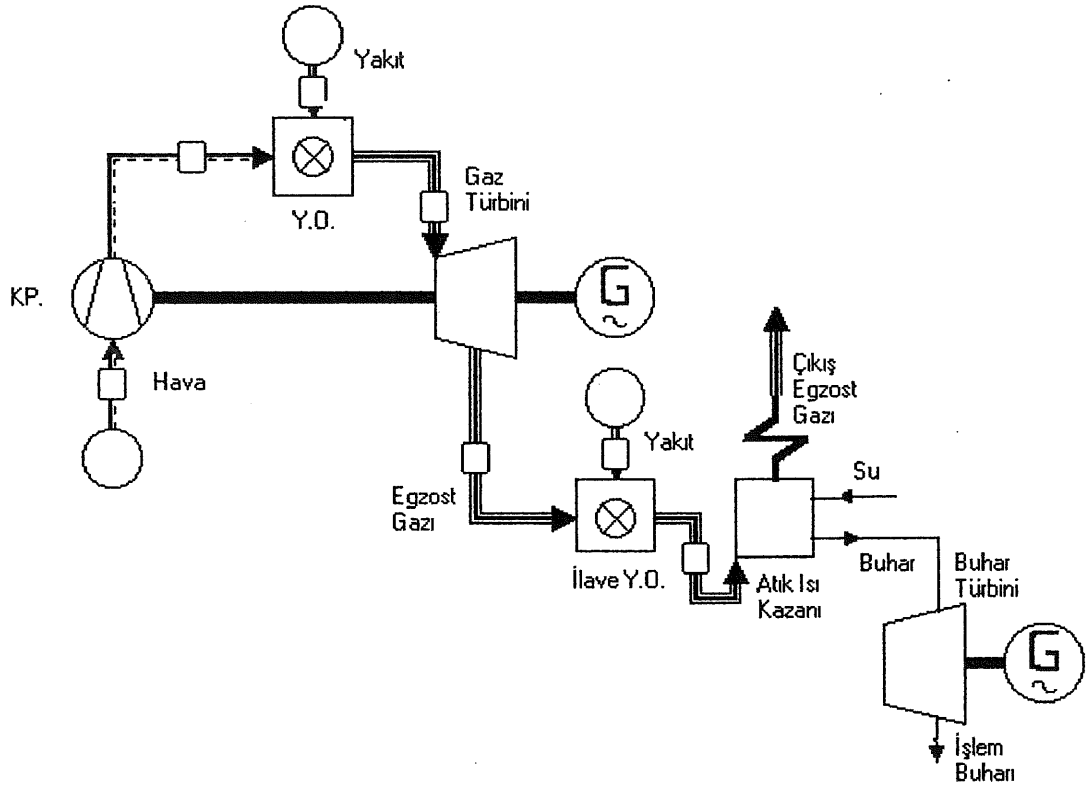
Şekil 4.19. O.G. Kojenerasyon Şalt Tesisi (Tek Türbinli Sistem , Regel Trafolu)

#### 4.5. Kombine Çevrimli Sistemler

Tekil çevrimler yüksek ısı çıkışı sağlarlar. Bu ısı, buhar üretmek için kullanılabilir. Üretilen buhar, elektrik üretimini arttırmak için bir buhar türbinine kısmen veya tamamen gönderilebilir. Bu sisteme kombine çevrim denir. Bu sistem gaz türbin sistemlerinde sıkça uygulanır. Gaz türbinleri yüksek dereceli ısı üretirler. Yani buhar türbin gücünü maksimize edecek kadar yüksek basınçta buhar üretebilir ve bölge için düşük basınçlı buhar ya da onun eşdeğeri sıcak su sağlanabilir. Eğer ilave yanma kullanılıyorsa kombine sistem, ısı ve elektriğin birlikte çok esnek üretimini sağlar (Güzel 1997).

#### 4.5.1. Karşı basınçlı türbin ile kombine çevrim

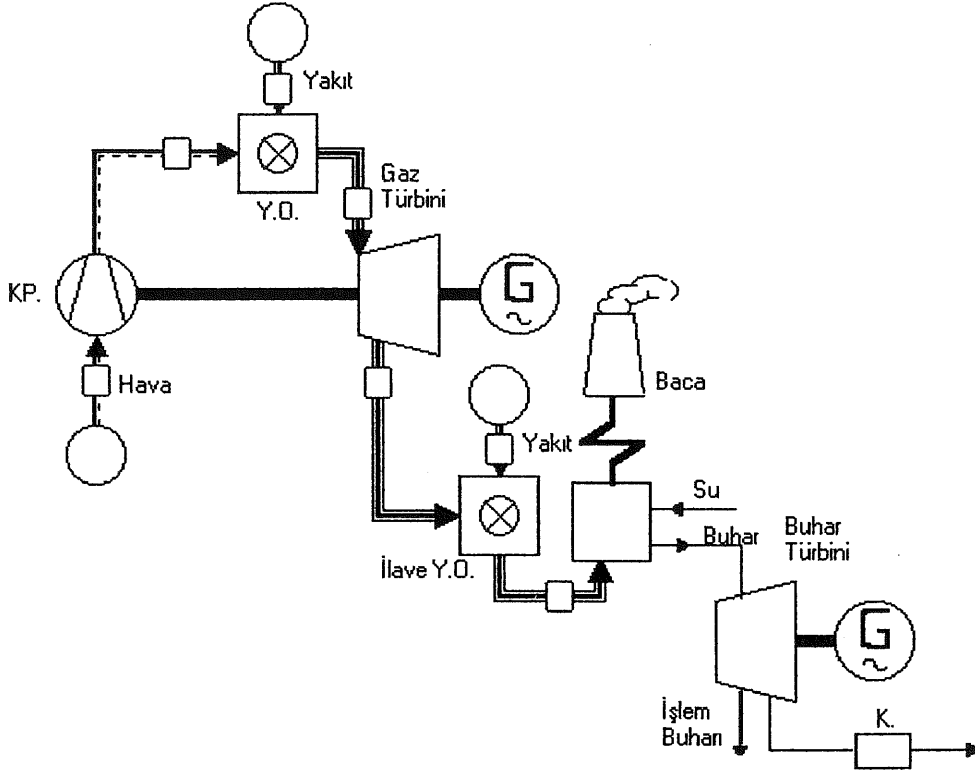
Elektrik üretimi ile tesis için gereken buhar da beraber üretilir. Atık ısı kazanı yüksek basınç ve sıcaklıkta buhar üretmek üzere tasarlanmıştır. Hem gaz türbininden hem de buhar türbininden güç üretilir.



Şekil 4.20. Karşı Basınçlı Türbin ile Kombine Çevrim

Şekil 4.20 deki sistemde gaz türbininden çıkan egzost gazları ilave yakıt odasında yakılıp atık ısı kazanına verilir. Atık ısı kazanında yüksek basınç ve sıcaklıkta buhar üretilir. Buhar, buhar türbinine verilir ve elektrik enerjisi üretilir. Türbinden çıkan buhar, tesiste işlem buharı olarak kullanılır.

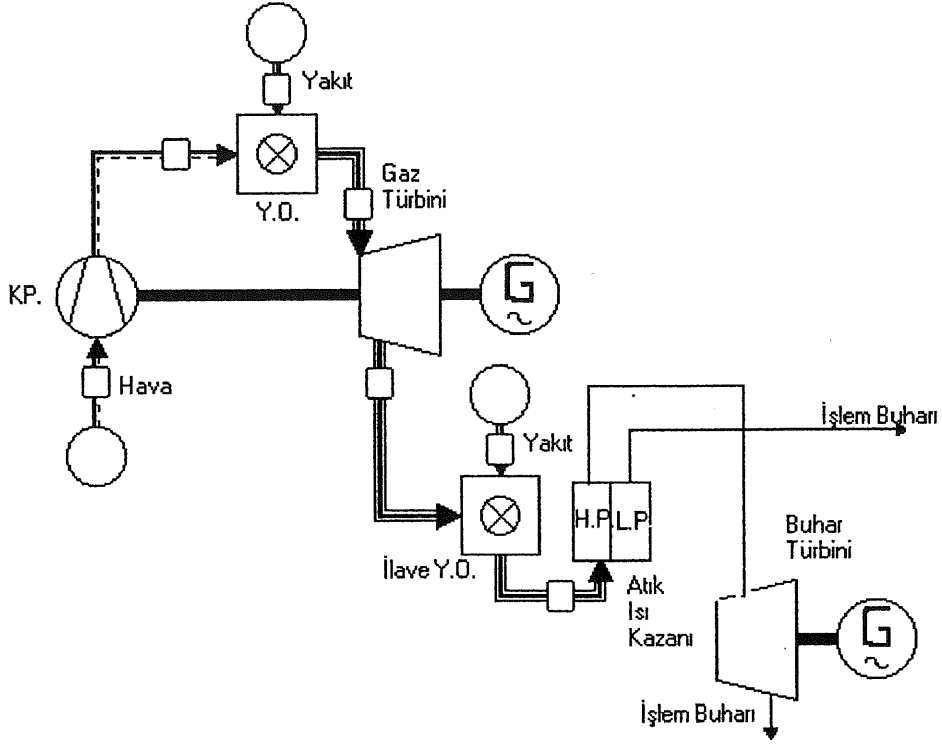
#### 4.5.2. Yoğuşma/Ekstraksiyon türbini ile kombine çevrim



Şekil 4.21. Yoğuşturma Türbini ile Kombine Çevrim

Şekil 4.21. deki sistemde türbinin yoğuşma (kondenser) bölümü, proses buharının üretimini azaltıp elektrik üretimini artırır.

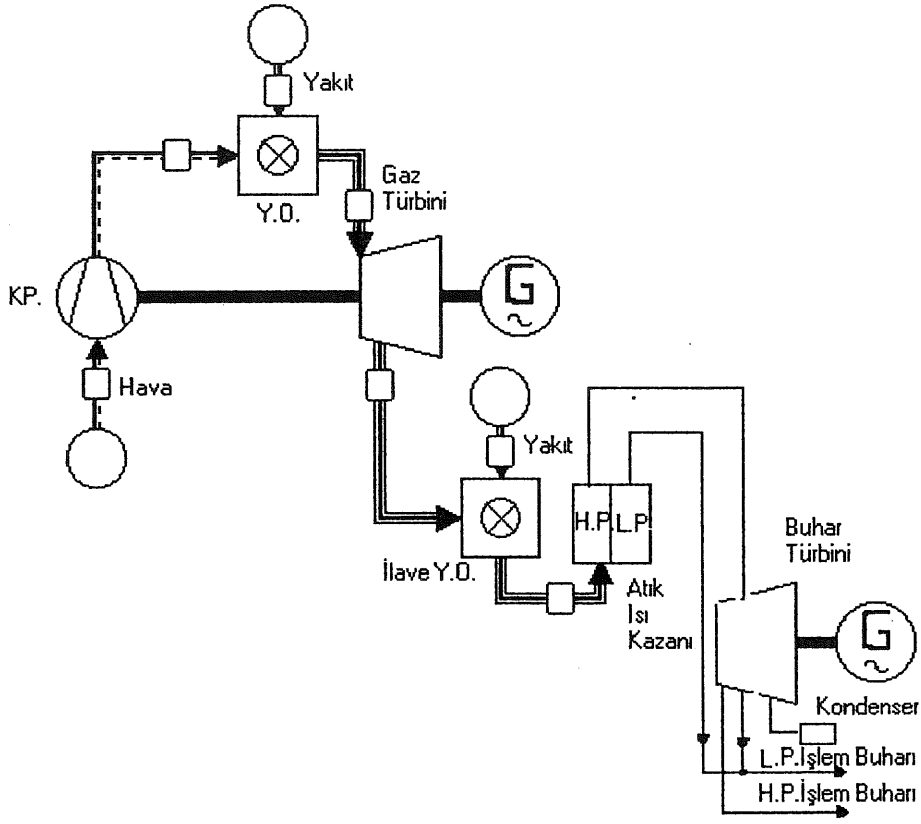
#### 4.5.3. Alçak ve yüksek basınç kademeli atık ısı kazanı kullanımı



Şekil 4.22. İki Kademeli Atık Isı Kazanı Kullanım Sistemi

Birden fazla basınç düzeyli atık ısı kazanlarında, gaz türbini egzost enerjisi, tek basınçlı kazanlara göre daha verimli kullanılır. Yani şekil 4.20 deki sisteme göre egzost gazının geri kazanımında artış sağlanmıştır.

Şekil 4.23. te ise Şekil 4.22 deki sisteme ek olarak bir yoğuşturucu bölüm vardır. Buhar türbinindeki yoğuşma bölümü, proses buharı talebine göre buhar üretiminin esnek olarak kullanımını sağlar.



Şekil 4.23. İki Kademeli Atık Isı Kazanı ve Kondenser Kullanım Sistemi

Buhar türbini tarafındaki kondenser, ısı-güç oranının artmasına neden olur. İşleme giden buhar az geldiğinde, türbinin düşük basınç bölümünden gereken miktarda buhar çekilerek eksik kapatılabilir. İşleme giden buharın fazla gelmesi halinde, bu fazlalık, buhar türbininin düşük basınç bölümünde genişlettikten sonra kondenserde enerjisini kaybeder ve buhar türbininde üretilen güç artar. Dolayısıyla ısı ve güç üretimi değişimlerinde büyük bir esneklik sağlanmış olur.

#### 4.6. Nükleer Yakıtlı Bileşik Isı-Güç Üretim Sistemleri

Nükleer yakıtlı bileşik ısı-güç üretimi sistemlerinin yatırım maliyeti büyük, işletme maliyeti ise oldukça düşüktür. Yıllık yararlanma süresi uzun olan yerler için uygun bir sistemdir. Nükleer yakıtlı bileşik ısı-güç üretimi sisteminde elektrik üretiminin yanı sıra merkezi ısıtma için uygun bir şekilde tasarlanabilir. Bu tip sistemde üretilen enerjiden yararlanma oranı % 70 civarındadır.

Nükleer yakıtlı sistemler, radyasyondan korunmak için, ısıtılacak yerlerin merkezinden 20-50 km uzağa kurulmalıdır. Bu nedenle merkezi ısıtmada kullanılacak ısı enerjisinin kanallar vasıtasıyla yerleşim yerlerine taşınması gerekir.

Kızgın su, yaklaşık 25 bar basınçta pompalanır. Basınçlandırmadaki amaç, buharlaşmayı önleme ve boru hattı içindeki suya herhangi bir radyoaktif sızıntıyı önlemektir. Buna göre kızgın su hattı tasarımında, suyun basıncı eşanjörde bu suyu ısıtmak üzere, tesisten çekilen buharın basıncından daima yüksek olur. Böylece eşanjörde herhangi bir arızanın gelmesi halinde fisyon artıklarının türbin çevriminden ısıtma suyuna karışması önlenmiş olur.

Boru hattının uzun olması ısı kayıplarını ve yatırım maliyetlerini artırmakta ve dolayısıyla sistemin ekonomikliliğini olumsuz yönde etkiler.



## BÖLÜM 5

### BİRLEŞİK ISI-GÜÇ ÜRETİM SİSTEMLERİNDE OPTİMUM SİSTEM KAPASİTESİ ve TÜRÜNÜN SAPTANMASI

#### 5.1. Enerji Üretiminde Seçenekler

Bu bölümde, elektrik enerjisi ve buhar şeklindeki ısı enerjisi gereksinimlerini karşılamak üzere bir B.I.G.Ü.(Bileşik Isı Güç Üretim) çevrimi kurmak isteyen bir endüstri tesisinin, böyle bir çevrim kurmasının ekonomik olup olmayacağını, hangi tür ve güçte bir çevrim kurmasının ekonomik olacağını tespiti ele alınmıştır(Alboyacı 1998).

Daha önceki bölümlere de sözü edildiği gibi birleşik ısı-güç üretiminin beş seçeneği vardır. Bu seçenekler,

- 1.**Seçenek:** Buhar ihtiyacının bir buhar kazanından, elektrik enerjisi ihtiyacının ise elektrik şebekesinden sağlanması biçiminde olan klasik sistem,
- 2.**Seçenek:** Buhar türbinli sistem,
- 3.**Seçenek:** Gaz türbini ve ateşlemesiz veya ilave ateşlemeli atık ısı kazanından oluşan bir sistem,
- 4.**Seçenek:** Gaz türbini, ateşlemesiz veya ilave ateşlemeli atık ısı kazanı ve buhar türbininden oluşan bir kombine çevrim sistemi,
- 5.**Seçenek:** Gaz veya Diesel motorlu bir çevrim sistemi,

olarak verilebilir.

Aşağıda, bu beş ayrı çevrimin ekonomik durumunu belirlemek üzere denklemler oluşturulacaktır. Bu denklemlerin çözümü sonucunda da birleşik ısı-güç sistemi için en uygun seçenek ortaya çıkacaktır.

Burada, ele alınan sanayi tesisinin elektrik gücü ve buhar gereksinimlerinin zamanla değiştiğini göstermek üzere, ele alınan bir günlük sürenin, daha küçük zaman dilimlerine bölüdüğü ve her dilim boyunca gereksinimin sabit kaldığı, ancak her bir ayrı dilimdeki değer, günlük yük değişiminin gereği olarak, birbirinden farklı olduğu kabul edilmiştir (sürekli değişimin basamak halindeki bir değişime dönüştürülmesi). Tesisin, günlük yük karakteristiklerinin yıl boyunca aynı kaldığı varsayılarak (ortalama günlük yük eğrisi kabulü), çözüm basitleştirilmiştir (Şekil 5.5 ve 5.6' daki gibi). Ancak, bu varsayımın, çözümün doğruluk derecesini azalttığı bir gerçektir. Böyle bir varsayımın yapılması, denklemlerdeki bilinmeyen sayısını azaltacağı için, çözüm daha basit olacaktır. Ayrıca, bir günlük süre içindeki zaman dilimlerinin sayısının artırılması da doğruluğu pozitif yönde etkilemekle beraber, bilinmeyen sayısını çoğaltması nedeniyle karmaşıklığın artmasına yol açacaktır.

Bu inceleme de ele alınan endüstri tesisi ile ilgili olarak, aşağıdaki tanımlar yapılmıştır. Bunlar şunlardır:

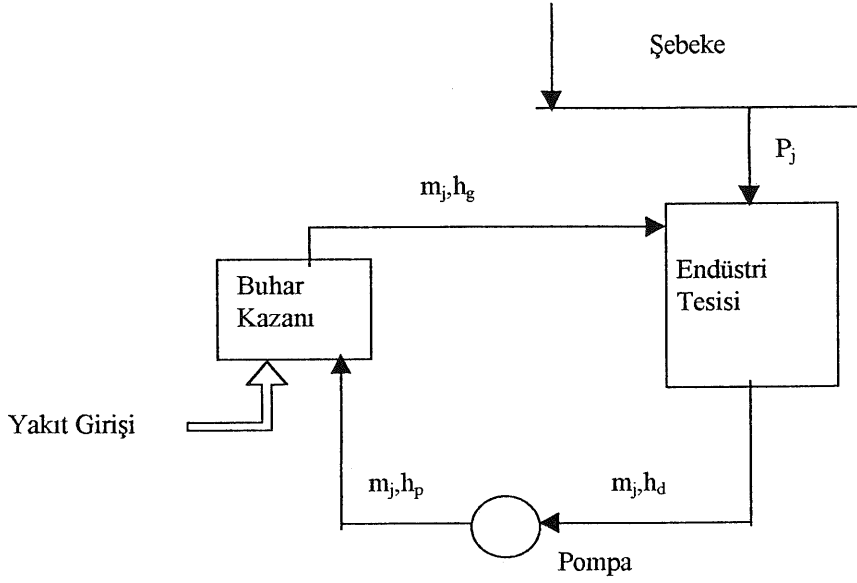
- N : bir gün içindeki zaman dilimlerinin sayısı,
- j : zaman diliminin numarası,
- t : bir zaman diliminin süresi (saat),
- k : tesisin bir yıl boyunca işletmede kaldığı gün sayısı,
- $P_j$  : tesisin j. dilimindeki elektrik gücü gereksinimi (kW),
- $m_j$  : tesisin j. dilimindeki buhar gereksinimi (ton/saat),
- $p_g, T_g, h_g$  : tesiste ihtiyaç duyulan buhar basıncı, sıcaklığı ve entalpisi (bar, °C, kJ/kg),
- $p_d, T_d, h_d$  : tesiste işlemden geçtikten sonra çevrime geri dönen su ya da buhar basıncı, sıcaklığı ve entalpisi (bar, °C, kJ/kg),

Buna göre, seçenekler sırayla ele alınıp, gerekli incelemeler yapılacaktır.

### **1. Seçenek: Buhar ihtiyacının bir buhar kazanından, elektrik enerjisi ihtiyacının ise elektrik şebekesinden sağlanması**

Burada, ilk adımda,  $h_g$  ve  $h_d$  parametreleri gidiş ve dönüş buhar koşullarına göre termodinamik tablolardan bulunmaktadır. Kolaylık açısından, geri besleme suyu

pompasının, entalpide yapacağı değişiklik ihmal edilerek  $h_p = h_d$  alınırsa, kazan tarafından buhara verilen birim enerji,



Şekil 5.1. Klasik Sistemin Şematik Gösterilimi

$$\Delta h = h_g - h_d \quad (5.1)$$

biçiminde ifade edilebilir.

Endüstri tesisinin yıllık elektrik enerji maliyeti,

$$A = k \cdot t \cdot \sum_{j=1}^N P_j \cdot f \quad (5.2)$$

buhar kazanında kullandığı yıllık yakıt maliyeti,

$$Y = k \cdot t \cdot \sum_{j=1}^N m_j \cdot \Delta h \cdot y / \eta_k \quad (5.3)$$

buhar kazanından yıllık işletme bakım maliyeti,

$$I = \text{Max}(m_1, m_2, \dots, m_N) \cdot \Delta h \cdot (i + b) \quad (5.4)$$

bir yıllık toplam maliyet,

$$C = A + Y + I \quad (\$/\text{yıl}) \quad (5.5)$$

biçiminde olacaktır. Yukarıdaki denklemlerde,

$f$  : elektrik enerjisi satan kuruluşun enerji birim satış fiyatı ( $\$/\text{kWh}$ ),

$y$  : birim yakıt fiyatı ( $\$/\text{milyon kJ}$ ),

$\eta_k$  : buhar kazanının verimi,

$\text{Max}(m_1, m_2, \dots, m_N)$  :  $m_1, m_2, \dots, m_N$  içinde en büyük değerde olanı,

$i, b$  : buhar kazanının yıllık birim işletme ve bakım masrafı [ $(\$/\text{yıl}) / (\text{kJ/h})$ ]

olarak tanımlanmıştır.

Buhar kazanının tesis maliyeti ise,

$$M = a \cdot \text{Max}(m_1, m_2, \dots, m_N) \cdot \Delta h \quad (\$) \quad (5.6)$$

biçiminde olup, burada,

$a$  : birim tesis maliyeti ( $\$/\text{kJ/h}$ )' dir.

## 2. Seçenek: Buhar türbinli sistem

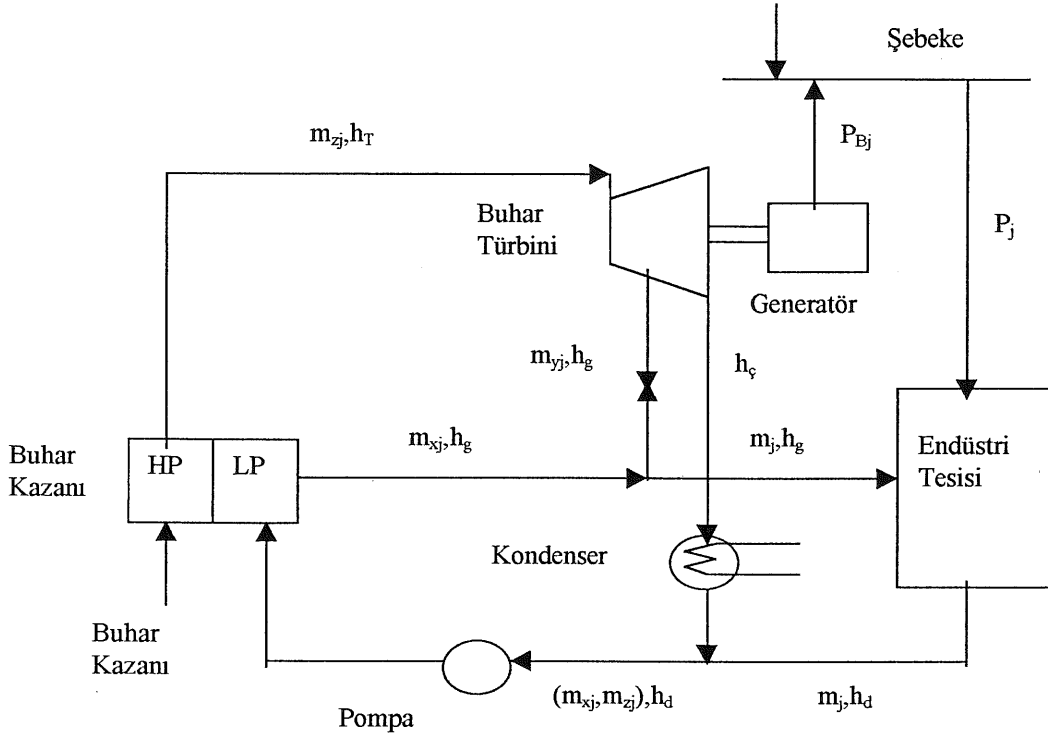
Buhar türbininin  $j$ . dilimde ürettiği mekanik güç,

$$P_{BTj} = [m_{zj} \cdot (h_T - h_g) + (m_{zj} - m_{yj}) \cdot (h_g - h_c)] \cdot 1/3600 \text{ (kW)} \quad (5.7)$$

dır. Elektriksel güç ise, geri besleme suyu pompasının çektiği gücün iç ihtiyaç gücü olarak düşünülmesi ve bunun üretilen elektriksel gücün yaklaşık %4' ü olduğu kabulü ile,

$$P_{Bj} = P_{BTj} \cdot \eta_g \cdot 0,96 \text{ (kW)} \quad (5.8)$$

biçiminde hesaplanacaktır.



Şekil 5.2. Buhar Türbinli Bir Çevrimin Şematik Gösterilişi

Yukarıdaki denklemlerde,

$h_T$  : kazandan çıkıp türbine giren buharın entalpisi (kJ/kg),

$h_ç$  : türbinden çıkıp kondensere giren buharın entalpisi (kJ/kg),

$m_{zj}$  : j. dilimde, kazanın yüksek basınçlı bölümünden çıkan buharın debisi (ton/saat),

$m_{xj}$  : j. dilimde, kazanın düşük basınçlı bölümünden çıkan buharın debisi (ton/saat),

$m_{yj}$  : j. dilimde, türbinin ara buhar alma noktasından çekilen ya da bu noktadan türbine giren çıkan buharın debisi (ton/saat),

$\eta_g$  : generatör verimi,

olarak tanımlanmıştır.

j. dilimde gerekli olan birim yakıt miktarı,

$$Y_{Bj} = [m_{xj} \cdot h_g + m_{zj} \cdot h_T - (m_{xj} + m_{zj}) \cdot h_d] \cdot /\eta_k \text{ (kJ/h)} \quad (5.9)$$

Bu çevrimde, şebekeden alınan, yıllık elektrik enerjisinin maliyeti,

$$A_B = k \cdot t \cdot \sum_{j=1}^N \text{Max}[(P_j - P_{Bj}), 0] \cdot f \quad (5.10)$$

Şebekeye elektrik enerjisi satışından elde edilecek yıllık gelir,

$$S_B = k \cdot t \cdot \sum_{j=1}^N \text{Max}[(P_{Bj} - P_j), 0] \cdot g \quad (5.11)$$

Yıllık yakıt masrafı ise,

$$Y_B = k \cdot t \cdot \sum_{j=1}^N Y_{Bj} \cdot f \quad (5.12)$$

biçiminde hesaplanacaktır.

Burada,

$g$  : elektriğin şebekeye satışındaki birim fiyatı (\$/kWh)

dır.  $\text{Max} [(P_j - P_{Bj}), 0]$  ifadesi,  $(P_j - P_{Bj})$ ' nin kontrolünü yapıp, bu değer in sıfırdan büyük olduğu durumlarda  $(P_j - P_{Bj})$  değerinin alınacağını, sıfırdan küçük olduğu aksi durumlarda ise bu değer in sıfır olarak alınacağını göstermektedir .

Bu çevrimde, işletme ve bakım masrafı dahil yıllık üretim masrafı,

$$C_B = A_B - S_B + Y_B + \text{Max}(P_{BT1}, P_{BT2}, \dots, P_{BTN}) \cdot (i_B + b_B) \text{ (\$/yıl)} \quad (5.13)$$

tesis in maliyeti,

$$M_B = a_B \cdot \text{Max}(P_{BT1}, P_{BT2}, \dots, P_{BTN}) \text{ (\$)} \quad (5.14)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Burada,

$i_B$  ,  $b_B$  : buhar türbinli çevrimin yıllık birim işletme ve bakım masrafları (\$/yıl/kW),

$a_B$  : buhar türbinli çevrimin birim tesis maliyeti (\$/kW),

olup, bu değerler çevrimin gücüne göre değişmektedir. Değişik güçlerdeki buhar türbinli çevrimlerin maliyetleri ve yıllık işletme masrafları kullanılarak,  $a_B$  ve  $i_B$ ' nin değerleri için bazı ampirik formüller ( $P_{BT}$ ' ye bağlı), eğri uydurma yöntemiyle bulunabilmekte olup, bu işlemler için mevcut bir takım paket programlardan faydalanılabilir. Genellikle, birim bakım masrafı ( $b_B$ ), birim tesis masrafının ( $a_B$ ) %3' ü mertebesinde dir. Bu genellemenin yapılması büyük bir hata getirmemektedir.

Bu matematiksel modellerin amacı, klasik bir sistem olan 1.seçeneğe göre yapılan yatırım farkının, klasik sisteme göre elde edilen yıllık üretim masrafı farkı (avantajı) ile geri ödendiği düşünülürse, bu geri ödeme süresini minimum yapan buhar türbini gücü, buhar kazanı kapasitesi ve bu minimum geri ödeme süresini bulmaktır. Burada amaç fonksiyonu için,

geri ödeme süresi,

$$H(m_{xj}, m_{yj}, m_{zj}, h_T) = (M_B - M) / (C - C_B) \quad (5.15)$$

ve sınır koşulları ise,

$$m_j = m_{xj} + m_{yj} \quad (5.16)$$

$$m_{xj}, m_{zj}, h_T \geq 0 \quad (5.17)$$

$$P_{BTj} \geq P_{BTmin} \quad (5.18)$$

ifadeleri yazılabilecektir. Burada,  $P_{BTmin}$ , imal edilen en küçük buhar türbini gücüdür.

Amaç fonksiyonu ve sınır koşulları biçiminde verilen bu denklemlerin, matematiksel programlama teknikleri ile çözümü sonucunda, buhar türbini gücü ve buhar kazanı kapasitesi belirlenmiş olmakla kalmayıp, ayrıca bunların gün içindeki çalışma programları da elde edilebilmektedir.

### 3. Seçenek: Gaz türbini ve ateşlemesiz veya ilave ateşlemeli atık ısı kazanından oluşan bir sistem

Sadece gaz türbini ve atık ısı kazanından oluşan bu çevrimde,  
Şebekeden elektrik enerjisi alım masrafı,

$$A_G = k \cdot t \cdot \sum_{j=1}^N \text{Max}[(P_j - P_{Gj}), 0] \cdot f \quad (5.19)$$

şebekeye elektrik enerjisi satışından elde edilen gelir,

$$S_G = k \cdot t \cdot \sum_{j=1}^N \text{Max}[(P_{Gj} - P_j), 0] \cdot g \quad (5.20)$$

gaz türbininde kullanılan yakıtın masrafı,

$$Y_G = k \cdot t \cdot \sum_{j=1}^N P_{Gj} \cdot d \cdot y \quad (5.21)$$

atık ısı kazanında kullanılan ek yakıtın masrafı ise,

$$K_G = k \cdot t \cdot \sum_{j=1}^N \text{Max}[(M_j \cdot \Delta h - 1 / s \cdot P_{Gj}), 0] \cdot y \quad (5.22)$$

biçiminde bulunabilir. Burada,

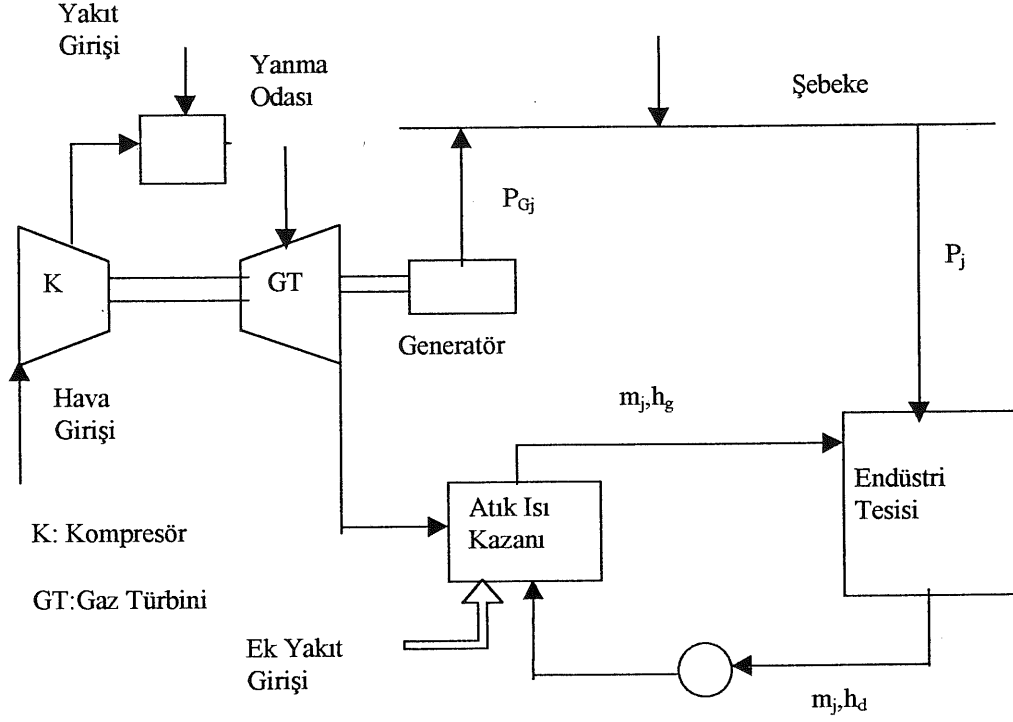
$P_{Gj}$  : gaz türbini tarafından j. dilimde üretilen elektriksel güç (kW)

$d$  : gaz türbininde 1 kW'lık elektriksel güç üretmek için gerekli olan yakıt miktarı (kJ/h / kW),

$s$  : gaz türbinli çevrimin ısı güç oranı (kW / kJ/h),

gösterilmektedir.





Şekil 5.3. Gaz Türbinli Basit Çevrimin Şematik Gösterilişi

Buna göre, bu çevrimin, işletme ve bakım masrafları dahil, yıllık üretim masrafı için,

$$C_G = A_G - S_G + Y_G + K_G + \text{Max}(P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{GN}) \cdot (i_G + b_G) \quad (5.23)$$

ifadesi verilebilir. Burada,

$i_G, b_G$  : gaz türbinli basit çevrimin yıllık birim işletme ve bakım masrafları (\$/yıl/kW) nı göstermektedir. Bu çevrimin tesis maliyeti ise,

$$M_G = a_G \cdot \text{Max}(P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{GN}) \quad (5.24)$$

olur.

Burada,

$a_G$  : birim tesis masrafı (\$/kW)

dır.

Daha önceki seçeneklerde olduğu gibi, burada da  $a_G$  ve  $i_G$  için ampirik bir formül,  $b_G$ ' nin değeri için ise  $\%3.a_G$  bağıntısı kullanılabilir. Bu durum için amaç fonksiyonu,

$$H(P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{GN}) = (M_G - M) / (C - C_G) \quad (5.25)$$

olup, sınır koşulu ise,

$$P_{Gj} \geq P_{Gmin} \quad (5.26)$$

şeklindedir.  $H$ ' ı minimum yapan  $P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{GN}$  değerlerinin bulunmasıyla gaz türbini gücü, atık ısı kazanı kapasitesi ve çevrimin günlük çalışma programı saptanmış olacaktır.

#### 4. Seçenek: Gaz türbini, ateşlemesiz veya ilave ateşlemeli atık ısı kazanı ve buhar türbininden oluşan bir kombine çevrim sistemi

Söz konusu bu çevrimin incelenmesi, 2. ve 3. seçeneklerdeki incelemelerin birleştirilmesiyle gerçekleştirilecek olup, buna göre,

bu çevrimden elde edilecek elektriksel güç,

$$P_{Kj} = P_{Bj} + P_{Gj} \quad (5.27)$$

bu çevrime ilişkin, elektrik enerjisinin şebekeden alım masrafı,

$$A_K = k \cdot t \cdot \sum_{j=1}^N \text{Max}[(P_j - P_{Kj}), 0] \cdot f \quad (5.28)$$

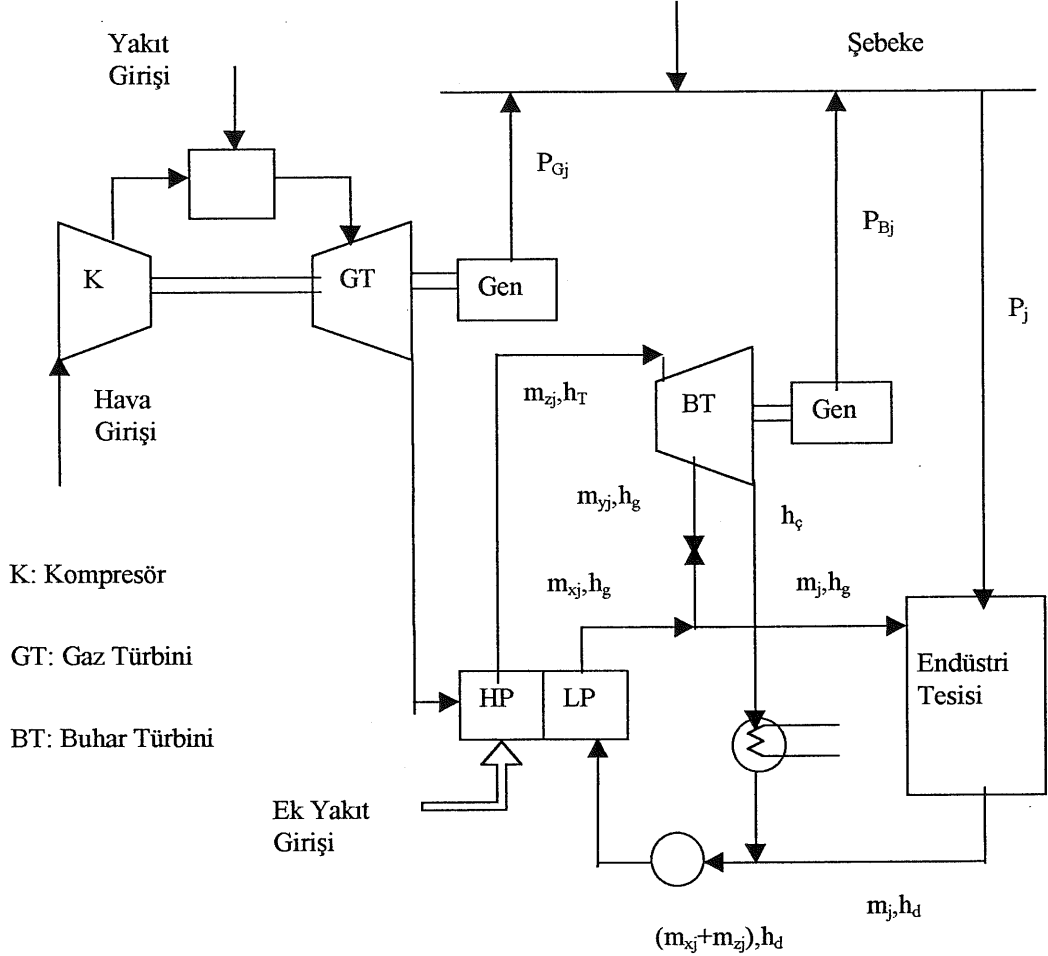
şebekeye elektrik enerjisi satışından elde edilecek gelir,

$$S_K = k \cdot t \cdot \sum_{j=1}^N \text{Max}[(P_{Kj} - P_j), 0] \cdot g \quad (5.29)$$

gaz türbininde kullanılan yakıt masrafı,

$$Y_K = k \cdot t \cdot \sum_{j=1}^N P_{Gj} \cdot d \cdot y \quad (5.30)$$

şeklinde hesaplanır.



Şekil 5.4. Kombine Çevrimin Şematik Gösterilişi

Atık ısı kazanında kullanılan ek yakıtın masrafı,

$$K_K = k \cdot t \cdot \sum_{j=1}^N \text{Max}[(Y_{Bj} \cdot \eta_k - 1 / s \cdot P_{Gj}), 0] \cdot y \quad (5.31)$$

işletme ve bakımı da içeren yıllık toplam üretim masrafı,

$$C_K = A_K - S_K + Y_K + K_K + \text{Max}(P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{GN}) \cdot (i_G + b_G) +$$

$$\text{Max}(P_{BT1}, P_{BT2}, \dots, P_{BTN}) \cdot (i_B + b_B) \quad (5.32)$$

tesis maliyeti ise,

$$M_K = M_B + M_G \quad (5.33)$$

ifadesine göre hesaplanacaktır.

Burada amaç fonksiyonu,

$$H(P_{Gj}, m_{xj}, m_{yj}, m_{zj}, h_T) = (M_K - M) / (C - C_K) \quad (5.34)$$

ve sınır koşulları,

$$m_j = m_{xj} + m_{yj} \quad (5.35)$$

$$m_{xj}, m_{zj}, h_T \geq 0 \quad (5.36)$$

$$P_{Bj} \geq P_{Bmin} \quad (5.37)$$

$$P_{Gj} \geq P_{Gmin} \quad (5.38)$$

biçiminde olup, H' yı minimum yapan  $P_{Gj}$ ,  $m_{xj}$ ,  $m_{yj}$ ,  $m_{zj}$ ,  $h_T$  değerleri bulunacaktır.

### 5. Seçenek: Gaz veya Dizel motorlu bir çevrim sistemi

Gaz ve Dizel motorlu çevrime ilişkin inceleme 3.seçenekteki gaz türbinli basit çevrim incelemesi ile benzer biçimde olacaktır. Burada gaz türbininin yerine, Gaz veya Dizel motoru kullanılıp, gaz türbinine ilişkin tüm büyüklükler ise motora ilişkin büyüklükler olarak değiştirilecektir. Bu nedenle, burada, aynı incelemeyi tekrarlamaya gerek duyulmamıştır.

Sonuç olarak, 1.seçenek referans alındığında, 2., 3., 4. ve 5. seçeneklerin bu seçeneğe göre sahip oldukları geri ödeme süreleri karşılaştırılarak, en kısa geri ödeme süreli seçeneğin uygunluğu kararlaştırılacaktır. Eğer bu seçeneğin geri ödeme süresi, piyasanın ekonomik koşullarına göre yeterince kısa ise, bu yatırımın gerçekleştirilmesi yönünde karar verilmelidir.

Aşağıda, elektrik ve ısı enerjisi gereksinimleri ve bunların gün içindeki değişimleri belli olan örnek bir endüstri tesisi için, kurulması düşünülen B.I.G.Ü sisteminin, optimum kapasitenin (gücünün) saptanması ele alınacaktır. Bu çalışmada, diğer çevrimlere ilişkin teknik ve ekonomik verilerin yeterli olmaması nedeniyle, sadece gaz türbinli basit bir çevrim için optimum güç hesabı yapılmıştır. Benzer çalışma, yeterli verilerin elde edilmesi halinde, sözü edilen diğer çevrimler için de gerçekleştirilebilecektir. Gaz türbinli çevrime ilişkin hesaplarda aşağıdaki tablolarda verilen değerler kullanılmıştır.

**Tablo 5.1.** Buhar Türbinli Çevrimlere İlişkin Toplam Maliyetler (1990 yılında)

Sistem	Kömür yakıtlı (SO <sub>2</sub> arındırmalı)	Kömür Yakıtlı (SO <sub>2</sub> Arındırması z)	Doğal Gaz Yakıtlı	Çöp yakıtlı (baca filtreli)	Doğal gaz Yakıtlı (Elektrik üretimi yok)
Yakıt girişi (MkJ/h)	305	305	305	316	258
Çıkış gücü (kW)	9350	9150	9350	9050	0
Buhar üretimi * (ton/h)	91	91	91	91	91
Topl. tesis maliyeti (M\$)	29.6	36.7	19.6	40.0	12.3
İşletme masrafı (M\$/yıl)	1.9	1.9	1.2	1.9	0.8
Bakım masrafı (M\$/yıl)	0.89	1.1	0.56	1.2	0.36

- 11.4 bar' da doymuş buhar

**Tablo 5.2.** Tablo 5.3' de Verilen Gaz Türbini Modellerinin Kullanıldığı Çevrimlere İlişkin Toplam Yatırım (tesis) Maliyetleri.(M\$)

Sistem	Model 5	Model 6	Model 7	Model 25	Model 50
Gaz türbinli basit çevrim					
Ateşlemesiz AIK' lı	22.8	28.2	48.7	23.4	31
Ek ateşlemeli AIK' lı	26.2	31.6	54.7	26.0	35
Gaz ve buhar türbinli Kombine çevrim					
Ateşlemesiz AIK' lı	34.6	42.2	70.7	31.3	34.6
Ek ateşlemeli AIK' lı	44.6	51.5	88.8	37.9	38.6

AIK: Atık Isı Kazanı

**Tablo 5.3. Değişik Gaz Türbinli Çevrimlere İlişkin Veriler**

Gaz türbini modeli	Model 5	Model 6	Model 7	Model 25	Model 50
Sadece gaz türbini (25°C deniz seviyesi)					
Yakıt girişi (Mkj/h) (HHV)*	340	445	939	220	314
Çıkış gücü (kW)	22400	33900	73200	19400	27300
Egzost çıkışı (ton/h)	420	474	1000	228	403
Egzost sıcaklığı (°C)	503	553	543	527	437
Gaz türb.ısıl verimi (HHV)*	%24	%27	%28	%31	%31
<b>Ateşlemesiz atık ısı kazanı</b>					
		Buhar üretimi (ton/h)			
12 (bar), 188 (°C)	66	87	178	39	49
30 (bar), 346 (°C)	53	72	146.5	32	38
62.7 (bar), 443 (°C)	45	63.5	129	27.5	
91.7 (bar), 485 (°C) ve 12 (bar), 188 (°C)**	45 13	60 14	121 32		
<b>Ek ateşlemeli atık ısı kazanı</b>					
Ek yakıt girişi (Mkj/h)	213	211	110		239.5
		Buhar üretimi (ton/h)			
30 (bar), 346 (°C)	131	147	71		126
62.7 (bar), 443 (°C)	122	137	67		117
91.7 (bar), 485 (°C)	118	134	65		114

\* HHV: Üst ısı değeri

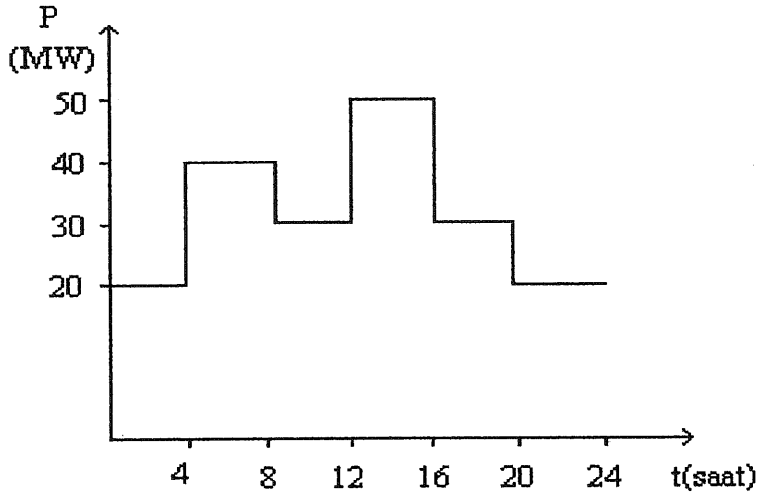
\*\* İki basınç düzeyli atık ısı kazanı

Ayrıca, burada çözümün basit olması açısından, üretilen gücün, gün boyunca, sabit ve nominal değerde kaldığı kabulü yapılmıştır. Bu yaklaşım, Türkiye gibi, alışı ve satış fiyatlarının gün içinde zamanla değişmeyip, sabit kaldığı (değişken enerji tarifesi kullanılmayan) ülkelerde kurulacak olan B.I.G.Ü. çevrimleri için büyük bir hata getirmeyecektir.

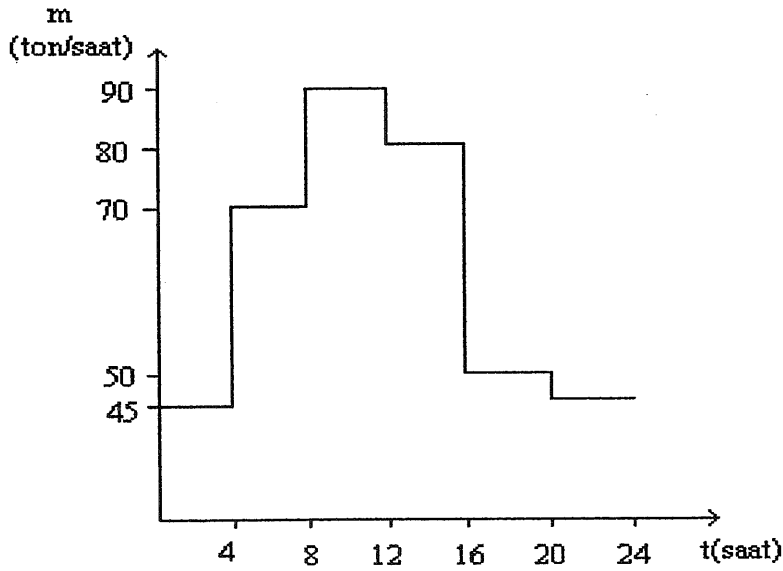
## 5.2. Örnek

Ele alınacak olan endüstri tesisi, 11,4 bar' da doymuş buhara gereksinim duymakta ve buharı çeşitli işlemlerde kullandıktan sonra 65,5 °C'de doymuş su olarak çevrime geri göndermektedir. Endüstri tesisinin, bu basınç ve sıcaklıktaki buhar ihtiyacını mevcut bir buhar kazanından sağladığı ve bu tesisin kullanılması ile düşünülen B.I.G.Ü. çevrimi maliyetinin %18 azaldığı kabul edilmiştir. Şekil 5.5 ve 5.6' da bu

sanayi tesisine ilişkin, ortalama günlük elektrik ve ısı yükü (buhar debisi) karakteristikleri verilmiş olup, bu tesis yilda 335 gün çalıştırılmaktadır.



şekil 5.5. Endüstri Tesisinin Ortalama Günlük Elektrik Enerjisi Gereksinimi



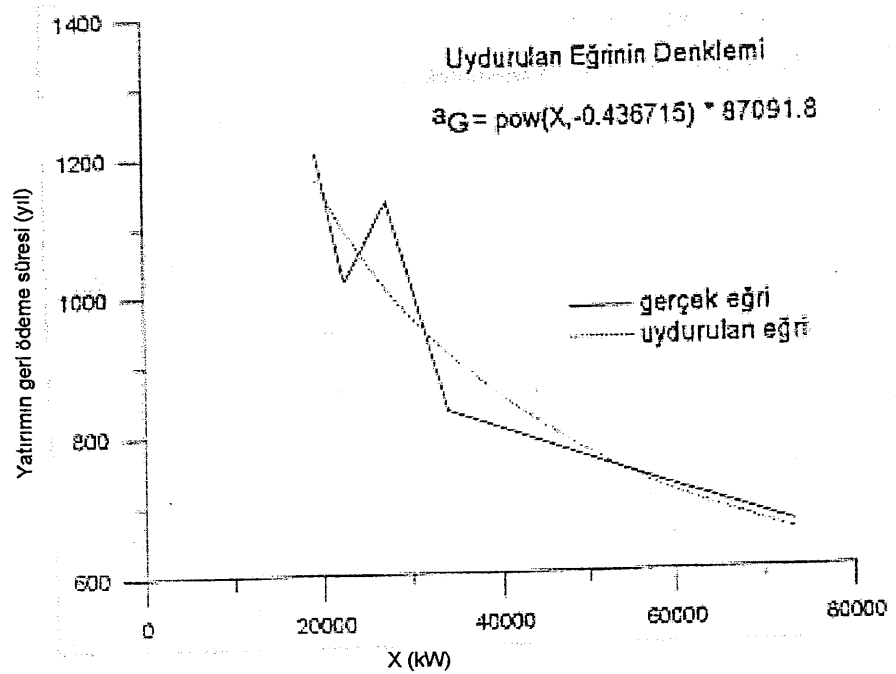
şekil 5.6. Endüstri Tesisinin Ortalama Günlük Isı Enerjisi (buhar) Gereksinimi

Kurulması düşünülen gaz türbinli çevrimin optimum gücünün bulunmasında, daha önce "4.Seçenek" adı altında verilmiş olan denklemlerden faydalanılmış ve bu denklemlerdeki  $P_G$  değeri, belli sınırlar arasında değiştirilerek, en küçük geri ödeme süresini veren değer, grafik yöntemle saptanmaya çalışılmıştır. Grafięin minimumdan geçtiği nokta civarında,  $P_G$ ' nin değişim aralığı daraltılarak daha hassas

bir grafik elde edilmiş, ayrıca, bu civardaki güç ve geri ödeme süresi değerleri bir tabloya aktarılmıştır (Tablo 5.1).

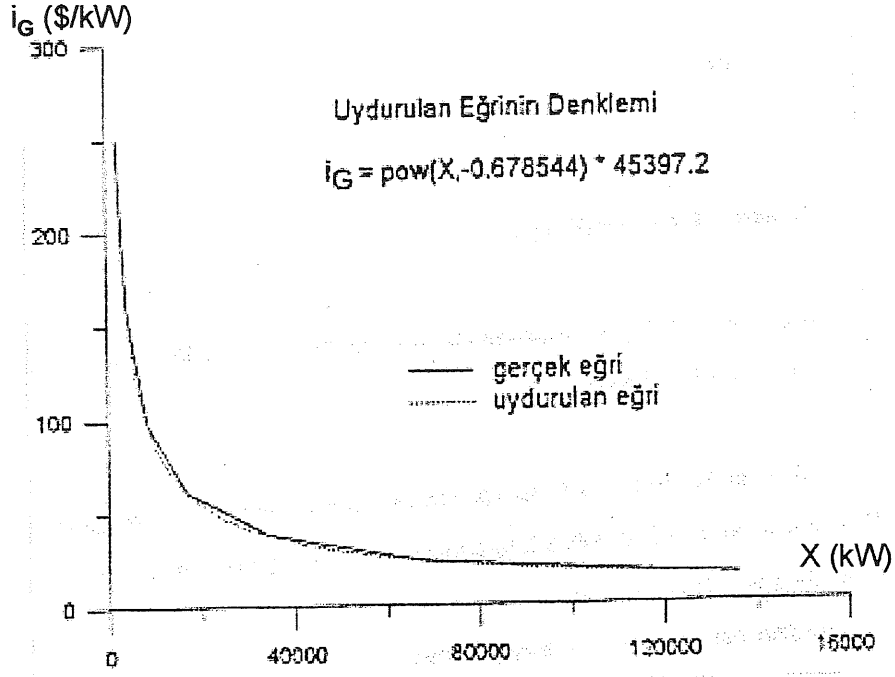
Aşağıda gerçekleştirilen işlemler ve sonuçlar verilmektedir. Burada  $P_G$  değişkeni yerine  $x$  değişkeni kullanılmıştır.

N	= 6	y	= 3,32 \$/milyon kJ
t	= 4 saat	d	= 12850 kJ/h/k/W
k	= 335 gün	s	= 1/7000 kW/kJ/h
$\Delta h$	= 2503 kJ/kg	M	= 12,3.10 <sup>6</sup> \$
f	= 0,05 \$/kWh	$\eta_k$	= 0,85
g	= 0,04 \$/kWh	j	= 1...6
P	= [20.10 <sup>3</sup> , 40.10 <sup>3</sup> , 30.10 <sup>3</sup> , 50.10 <sup>3</sup> , 30.10 <sup>3</sup> , 20.10 <sup>3</sup> ] kW		
m	= [45.10 <sup>3</sup> , 70.10 <sup>3</sup> , 90.10 <sup>3</sup> , 80.10 <sup>3</sup> , 50.10 <sup>3</sup> , 45.10 <sup>3</sup> ] kg/saat		



Şekil 5.7. Birim Tesis Maliyetinin Güce Göre Değişimi





Şekil 5.8. Birim İşletme Masrafının Güce Göre Değişimi

$$A_K(x) = k \cdot t \cdot f \cdot \sum_{j=1}^N [|P_j - x| + P_j - x] / 2 \quad (5.39)$$

$$S_G(x) = k \cdot t \cdot g \cdot \sum_{j=1}^N [|x - P_j| + x - P_j] / 2 \quad (5.40)$$

$$Y_G(x) = x \cdot d \cdot t \cdot N \cdot k \cdot y \cdot 10^{(-6)} \quad (5.41)$$

$$K_G(x) = k \cdot t \cdot y \cdot 10^{(-6)} \cdot \sum_{j=1}^N [|m_j \cdot \Delta h - 1 / s \cdot x| + m_j \cdot \Delta h - 1 / s \cdot x] / 2 \quad (5.42)$$

$$M_G(x) = x^{(-0.436)} \cdot 87091,8 \cdot x \cdot 0,82 \quad (5.43)$$

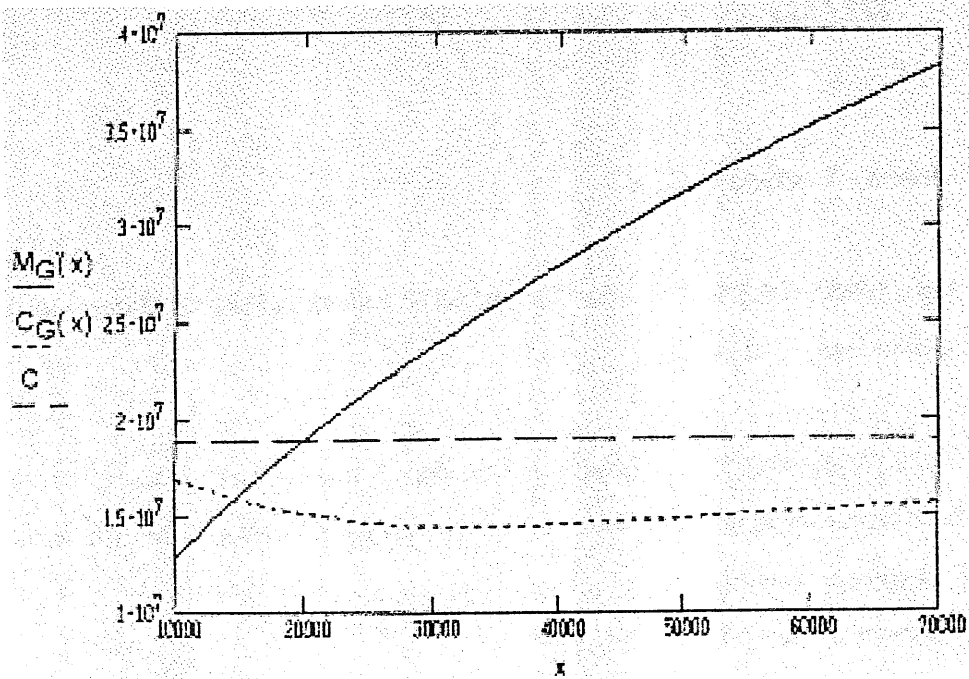
$$C_G(x) = A_G(x) - S_G(x) + Y_G(x) + K_G(x) + 0,03 \cdot M_G(x) + x^{(-0,678)} \cdot 45397,2 \cdot x + 2,02 \cdot 10^6 \quad (5.44)$$

$$C = k \cdot t \cdot \sum_{j=1}^N [P_j \cdot f + m_j \cdot \Delta h / \eta_k \cdot y \cdot 10^{(-6)}] + 0,03 \cdot M + 0,8 \cdot 10^6 \quad (5.45)$$

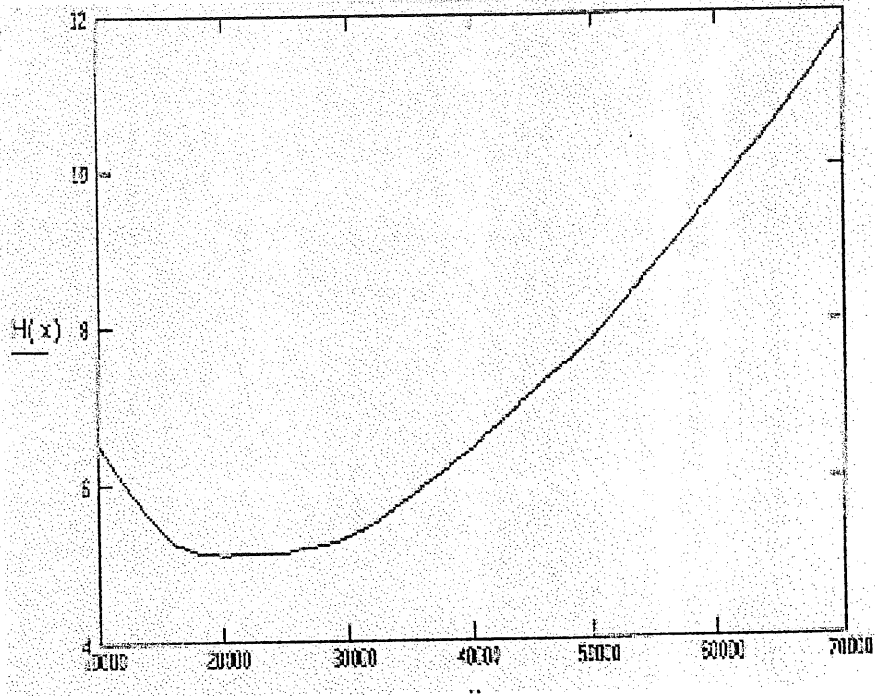
$$x = 10 \cdot 10^3, 11 \cdot 10^3 \dots 70 \cdot 10^3$$

$$H(x) = M_G(x) / [C - C_G(x)] \quad (5.46)$$

Şekil 5.9' da,  $x$ ' in 10...70 MW aralığındaki değişimine göre elde edilen gaz türbinli çevrime ilişkin tesis maliyeti ( $M_G(x)$ ), yıllık üretim masrafı ( $C_G(x)$ ) ve klasik sisteme ilişkin yıllık üretim masrafı ( $C$ ) grafikleri gösterilmektedir. Şekil 5.10' da ise  $x$ ' in aynı aralıktaki değişimine karşılık elde edilen yatırım geri ödeme süresi ( $H(x)$ ) verilmektedir. Şekil 5.10' da görüldüğü gibi  $H(x)$ ,  $X=20$  MW civarında minimumdan geçmekte olup, tam olarak minimum nokta, bu şekil üzerinde tam olarak görülememektedir. Daha doğru bir sonuca ulaşmak amacıyla,  $X$ ' in 19,5 ... 20,5 MW aralığındaki değişimine karşılık düşen, daha hassas bir  $H(x)$  grafiği Şekil 5.11' de gösterilmiştir. Ayrıca  $X=20$  MW civarındaki güç ve geri ödeme süresi değerleri hesaplatılmış ve elde edilen değerler, Tablo 5.1' de verilmiştir.



Şekil 5.9.  $x=10 \dots 70$  MW Aralığında  $M_G$ ,  $C_G$  ve  $C$ ' nin  $x$ ' e Göre Değişimi

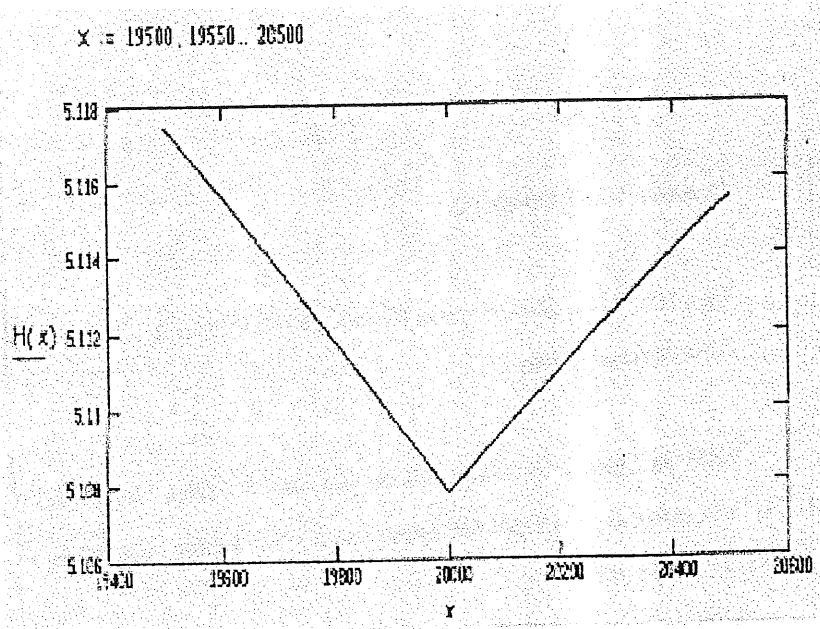


Şekil 5.10.  $x=10...70$  MW Aralığında Yatırımın Geri Ödeme Süresi (H)' nin  $x'$  e Göre Değişimi

Tablo 5.4.  $x=19,8 \dots 20,2$  MW Aralığında Geri Ödeme Süresinin  $x'$  e Bağlı Değişim Tablosu

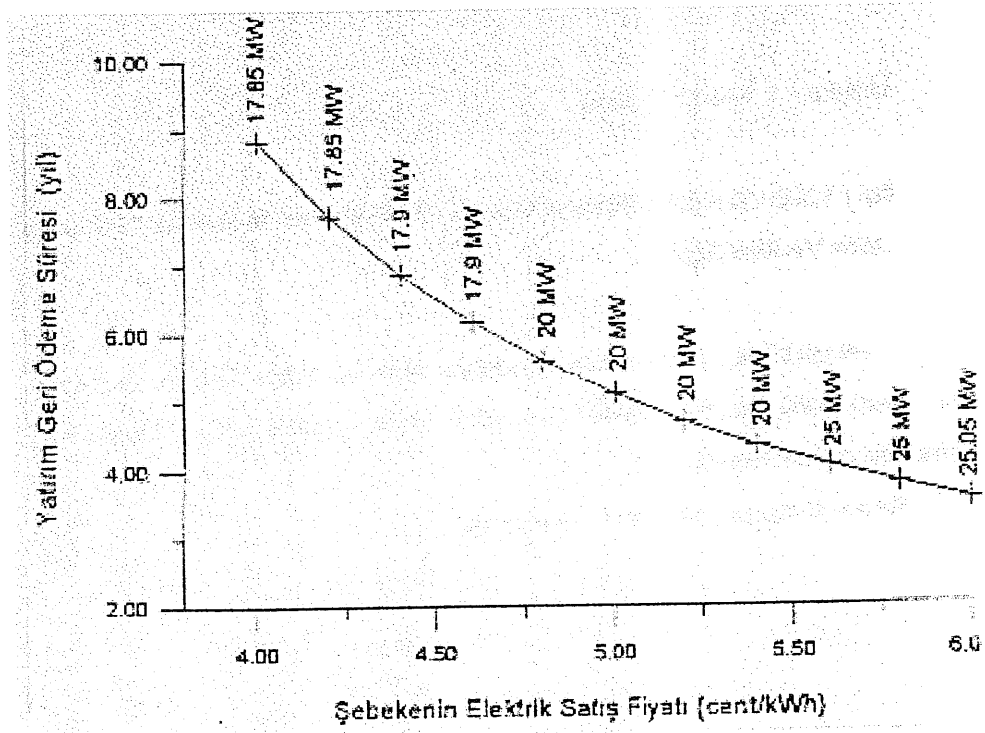
$x$	$H(x)$
19800	5.11172
19850	5.11074
19900	5.10975
19950	5.10875
20000	5.10775
20050	5.10858
20100	5.10940
20150	5.11021
20200	5.11100

Değişik şebeke elektrik satış ve geri alış fiyatları ve doğal gaz fiyatları için, her bir fiyata karşılık düşen optimum güç ve bu güçteki yatırımın geri ödeme süresi değerleri elde edilmiştir. Bu değerler grafik olarak Şekil 5.12, 5.13 ve 5.14' te gösterilmiştir.



Şekil 5.11.  $x=19,5...20,5$  MW Aralığında, Yatırım Geri Ödeme Süresinin  $x'$  e Bağlı Değişimini Daha Hassas Olarak Gösteren Grafik

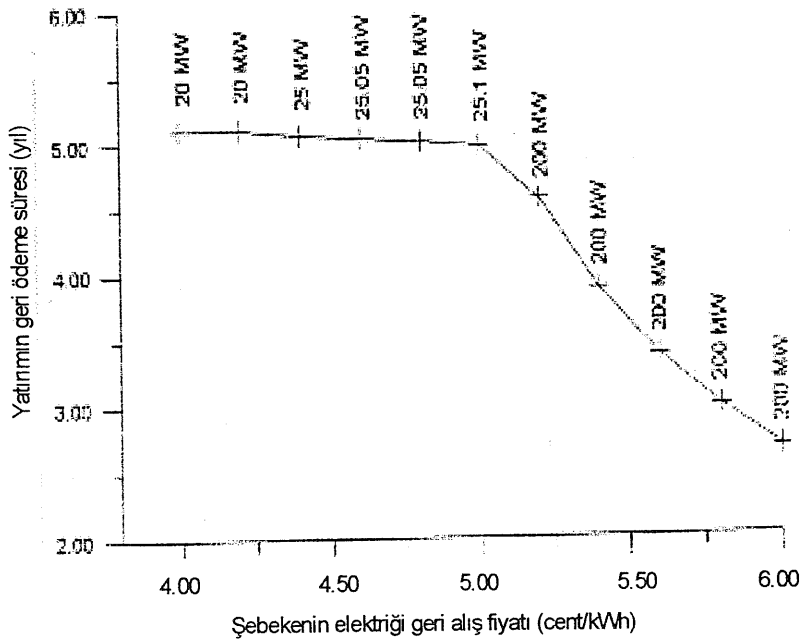
Şekil 5.11 ve Tablo 5.4' den görüldüğü gibi optimum çevrim gücü '20 MW ve bu güçteki çevrim için yapılan yatırımın geri ödeme süresi yaklaşık 5,1 yıldır.



Şekil 5.12. Yatırımın Geri Ödeme Süresinin, Şebekenin Elektrik Satış Fiyatına Göre Değişimi

Şekil 5.12' de görüldüğü gibi, şebekenin elektrik satış fiyatı attıkça yatırım geri ödeme süresi düşmektedir. B.I.G.Ü ile elektrik enerjisi üretilerek şebekeden elektrik enerjisi alımında tasarruf sağlanması ve artan şebeke fiyatlarıyla bu tasarrufun daha da çoğalması nedeniyle böyle bir sonuç ortaya çıkmıştır. Başka bir ifadeyle, şebekenin elektrik satış fiyatının artmasına karşın, endüstri tesisinin ürettiği elektrik enerjisinin birim fiyatı olarak düşünülebilen EDY (Elektriğe Dönüşen Yakıt) oranının sabit kalması bu sonucu doğurmuştur.

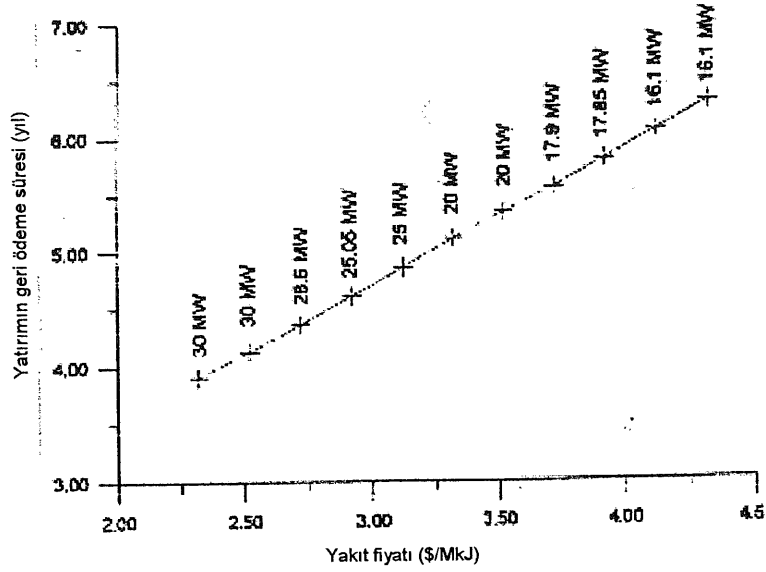
Artan şebeke geri alış fiyatıyla yatırım geri ödeme süresinin, belli bir değere kadar fazla değişmediği, bu değerden sonra hızlı bir düşüş gösterdiği Şekil 5.13' den görülmüştür. Burada da gaz türbinli çevrimin EDY oranı sabit olup, şebekenin belirli bir elektrik geri alış fiyatı değerine kadar (yaklaşık 5 ¢/kWh), EDY ile elektrik geri alış fiyatı arasında, güç artışının getireceği tesis maliyeti artışlarını karşılayacak kadar yeterli fark oluşmadığı için, şebekeye büyük miktarlarda elektrik satışı uygun değildir.



**Şekil 5.13.** Yatırımın Geri Ödeme Süresinin, Şebekenin Elektriği Geri Alış Fiyatına Göre Değişimi

Bu nedenle, bu değere kadar elektrik geri alış fiyatının artması yatırım geri ödeme süresini fazla düşürmemekte, optimum güç fazla artmamaktadır. Bu değerden sonra,

yeterli farkın oluşması nedeniyle şebekeye büyük miktarlarda elektrik satılabilmekte ve geri ödeme süresi hızla düşmektedir. Gerçekte, şebekenin, elektriği sattığı fiyattan daha yüksek bir fiyattan geri alması, şebeke açısından kaçınılması gereken bir durumdur.



Şekil 5.14. Yatırımın Geri Ödeme Süresinin, Yakıt Fiyatına Göre Değişimi

Bununla birlikte, değişken elektrik tarifesinin uygulandığı ülkelerde, gün içinde, kısa süreli olarak böyle bir durumla karşılaşılmaktadır. Bu ülkelerde B.I.G.Ü. santrallerinin günlük çalışma programları da bu değişime göre planlanmaktadır.

Şekil 5.14' de yakıt (bu örnekte doğal gaz) fiyatının yükselmesiyle yatırım geri ödeme süresinin arttığı görülmektedir. Yakıt fiyatının artması, yakıt farkının güç farkına oranı olarak tanımlanmış olan EDY oranını yükseltmektedir. Dolayısıyla, B.I.G.Ü. ile üretilen elektrik enerjisinin (1 kWh) klasik sisteme göre sağladığı kazanç azalmakta ve böylece geri ödeme süresi artmaktadır (Alboyacı 1998).

## BÖLÜM 6

### TÜRKİYE'DE KURULAN BİLEŞİK ISI GÜÇ SANTRALLERİNİN ÖNEMİ ve ÇEVREYE ETKİLERİ

Bu bölümde B.I.G.Ü. sistemleri çevre sorunları bakımından ele alınmış ve diğer santral türleri ile karşılaştırmalı olarak önem ve üstünlükleri açıklanmaya çalışılmıştır.

#### 6.1. Türkiye'de Enerji Kaynakları ve Kojenerasyon

Türkiye Bileşik Isı Güç Üretim santralleri kurulması bakımından son altı yıldır hızlı bir gelişme göstermiştir. Türkiye, Avrupa' da bu alanda yükselenlerin içindedir. 1994'e kadar toplam 30 MWe kapasiteli 4 B.I.G.Ü. santrali vardı. 1998 sonuna kadar toplam kapasitesi 1100 MWe olan 47 B.I.G.Ü santrali işletilmeye alındı. 1998'in sonunda 51 santral daha yapım aşamasındaydı ve 46 benzer proje de bakanlıktan onay bekliyordu(Turkey Cogen1999)

Bu durum hükümetin desteğiyle ilerlemiştir. Bileşik Isı Güç Üretim santrallerinin önem kazanmasındaki en büyük etken güç üretimindeki kısıtlamalardır.

Türkiye enerji kaynakları bakımından kendine yeterli değildir. 1996'da Türkiye'deki toplam enerji ihtiyacı yaklaşık 67 milyon ton eşdeğer petroldü(mtoe). Türkiye'nin ekonomisi ve nüfustaki hızlı büyüme oranı göz önüne alınırsa 2000 yılında ortalama %6 yıllık artışla Türkiye'deki toplam enerji ihtiyacının 86 mtoe ulaşacağı tahmin edilmektedir. Birincil enerji ürünleri toplam ihtiyaçtan çok daha azdır. Bundan dolayı tüketimdeki ithal edilen enerjinin bölümünü artmaya devam edecektir. 2000 yılında %52'ye , 2010 yılında ise %62'ye ulaşacağı tahmin edilmektedir. (1996'da %48 idi)

Türkiye doğal kaynaklarından maksimum şekilde faydalanmalıdır. Bunlar genel

olarak yenilenebilir enerjiler (su, güneş, rüzgar, jeotermal) ve düşük kaliteli kömürdür. Enerji güvenliğini sağlamak için Türkiye, büyüme oranına göre enerji açığını karşılamak için doğal gaz, petrol ve yüksek kalitede kömür ithal etmesi gerekir.

Türkiye yaklaşık olarak 10 milyar tonluk düşük kalitede kömür rezervine sahiptir. Bu rezervlerin %45'i evsel tüketimler ve termik güç santralleri için yakıt sağlama amaçlı işletilmektedirler.

Türkiye'nin yeterli bir doğal gaz rezervi yoktur. Bilinen rezervler 10 milyar m<sup>3</sup> civarı ve yıllık üretim 300 milyon m<sup>3</sup> civarındadır. 1987 den beri Türkiye Rusya'dan ve Cezayir'den doğal gaz ithal etmektedir.

Su gücü potansiyeli yaklaşık 30.000 MWe tir. Bunun 10.000 MWe kısmı kullanılmaktadır. Diğer 10.000 MWe lik kısmı 2010' da işletilmeye alınacaktır. Şu anda yaklaşık 110 güç santrali yapım halindedir.

Türkiye'de güneş enerjisi bakımından zengindir. Fakat yaz döneminin uzun olduğu ülkenin batı ve güney kısımlarında güneş enerjisinden faydalanılması daha uygundur.

Jeotermal enerji kaynakları 4.000 MWe kapasitesindedir. Şu anda 32 MWe kısmı kullanımdadır.

Türkiye'de uranyum cevheri vardır. Halkın nükleer kirliliğe olan duyarlılığından dolayı ve teknoloji bağımlılığına dayanması nedeniyle nükleer güç santrali kurulması 1997'ye kadar ertelenmişti. Sonra hükümet ilk nükleer güç santrali için uluslar arası fiyat teklifini açıkladı.

**Tablo 6.1.** Elektrik Üretimindeki Yakıt Kullanımı(bin ton petrol)

TAŞKÖMÜRÜ	636
LİNYİT	8,196
PETROL	2,052
DOĞAL GAZ	4,193
JEOTERMAL ENERJİ	71



Kojenerasyon santrallerinde kullanılan ana yakıt doğal gazdır. Kojenerasyon santrallerinin %90'ında doğal gaz , %7'sinde LPG , %3'ünde ağır petrol kullanılır.

**Tablo 6.2. Elektrik**

KURULU GÜÇ	23,000 MWE
YILLIK ÜRETİM	104,500 GWH

**Tablo 6.3. Bileşik Isı Güç Üretim Sistemleri**

KURULU GÜÇ	1,100 MWE
ELEKTRİK ÜRETİMİ	7,500 MWH
TOPLAMDAKİ PAYI	%7
ADEDİ	47
ORTALAMA KAPASİTE	25 MWE
ORTALAMA BİRİM KAPASİTE	10 MWE

Bileşik Isı Güç Üretim santrallerinin büyük çoğunluğu endüstriyel sektörde kullanılmaktadır ve kullanım alanının %70 'i tekstil sektörüdür. Türkiye'de B.I.G.Ü. santrallerinden faydalanılarak ısıtma ve soğutma henüz yeni başlamıştır. 200 yılında en az 10 santral ısıtma soğutmaya yönelik çalışacak ve yaklaşık olarak 50.000 ev bundan faydalanacaktır (Turkey Cogen 1999)

## **6.2. İleriye Dönük Market Araştırması**

1998'in sonunda kojenerasyon santrallerinin toplam kapasitesi 2,250 Mwe idi ve bu değer Türkiye'deki toplam kapasitenin %9'unu oluşturuyordu (Turkey Cogen 1999).

**Tablo 6.4.** Yıllara Göre Bileşik Isı Güç Üretim Sistemlerindeki Gelişme Beklentileri

YIL	KAPASİTE (MWE)	TEP	TOPLAM GÜÇ KAP.	CHP PAYI %
1998	2,250	475	25,000	9
1999	2,750	515	27,000	10
2000	3,240	610	29,700	11
2005	7,543	4,303	42,200	18
2010	13,447	5,904	62,500	21
2020	29,552	16,105	113,000	26

### **6.3.Bileşik Isı Güç Sistemlerinin Çevre Korumaya Katkısı**

Elektrik enerjisinin kullanılmaya başlanması ile birlikte fosil kaynaklar ikincil enerji kaynağı olan bu enerjinin elde edilmesinde önemli bir yer almış ve giderek artan bir oranda kullanılmaya devam etmiştir. Çeşitli fosil yakıt türlerinden verimli ve ekonomik olarak yararlanabilme, bir yandan da bu yakıtların kullanımının çevreye olumsuz etkilerini azaltabilmek için çalışmalar sürdürülmektedir.

#### **6.3.1.Fosil yakıtlı santrallerden kaynaklanan çevre sorunları**

Katı, sıvı ve gaz şeklindeki fosil yakıtlar jeolojik çağlar boyunca bitkisel ve hayvansal artıkların havasız ortamda zamanla biyokimyasal ve fiziksel etkilerle değişime uğramaları sonucu oluşurlar. Bütün fosil yakıtlarda esas bileşen karbon ve karbon türevleridir. Bunun yanında daha az oranlarda hidrojen, oksijen, kükürt ve azot bileşim de yer almaktadır. Yanma reaksiyonu ile ortaya çıkan fosil yakıt emisyonları, birincil ve ikincil kirleticiler diye sınıflandırılmaktadır. Birincil kirleticiler CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, partiküller ve hidrokarbonlar iken, yanma dışı reaksiyonlar ve güneşin UV ışınları ile ikincil kirleticiler oluşmaktadır. Bu grupta aldehitler, olefinler, nitrosamin, oksidantlar gibi kirleticiler bulunmaktadır. Birincil ve ikincil kirleticilerin bazıları sera etkisi oluşturmakta ve iklim değişikliğine neden olmaktadır. Küresel ölçekteki etkilerin yanısıra fosil yakıtlı elektrik santrallerinden

atmosfere yapılan emisyonlar gerek mahalli gerekse bölgesel ölçekte insan ve çevre üzerine çok önemli etkiler yaratmaktadır. Fosil yakıtlı elektrik santrallerinden oluşan emisyonların yayılım miktarı kullanılan teknoloji ve yakıt cinsine bağlıdır.

Fosil yakıtların tümünün bileşiminde az veya çok miktarda kükürt bulunur. Yanma sonucu bu kükürt  $SO_2$  ve  $SO_3$  şekline ( $SO_x$ ) dönüşür. Kükürt oksitler solunum yolu enfeksiyonlarına ve kalp rahatsızlıklarına neden olduğu gibi atmosferde su ile reaksiyona girerek asit yağmurlarına neden olurlar ve kültür alanlarında, ormanlarda, doğal bitki örtüsünde, göllerde ve nehirlerde büyük tahribat yapar.

Fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan diğer bir kirletici grup azot oksitlerdir. ( $NO_x$ ) . azot oksitlerin oluşumu esas olarak yakıtın bünyesindeki azot elementinin yanması sonucu oluşur, ancak yanma kamarasındaki yüksek sıcaklık hava bileşimindeki azotun da  $NO_x$  'lere dönüşmesine neden olmaktadır.  $NO_x$  emisyonu  $CO_2$  gibi sera etkisi oluşturmada ayrıca canlılarda akciğer dokusunu tahrip etmekte ve asit yağmurlarına dönüşmesi nedeniyle yine doğaya ve çevreye büyük zarar vermektedir.

Fosil yakıtın cinsine ve yanma işlemine bağlı olarak değişen miktarlarda zehirli karbon monoksit gazı oluşmaktadır. Yanma sonucu oluşan bazı kirleticiler ise kanserojen olarak bilinmektedir.

Katı (kömür) ve sıvı (fuel-oil) yakıtların yakılması sonucunda termik santral bacalarından atmosfere önemli derecede partikül yayılımı olabilmektedir. Oluşan küller ise önemli çevre sorunu yaratmaktadır. Gerek havaya atılan partiküllerin gerekse katı atık şeklinde oluşan yapısında bulunan ağır metaller toprak ve su kirliliğine neden olmaktadır.

Bileşik ısı – güç üretimi biçiminde olmayan termik santraller, atılan kondenser ısısı nedeniyle çevrede ısıl kirlenmeye neden olmaktadır. Ayrıca linyit veya kömür kullanılan termik santraller açısından kömür işletme sahalarındaki doğa tahribatı, kömür depolanması ve kömür nakli çevreyi olumsuz yönde etkilemektedir.

Fosil yakıtlı elektrik santrallerinin yerel ve bölgesel ölçekteki olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla tüm dünyada baca gazı ve tozu arıtım sistemleri kullanılmaya başlanmıştır, fosil yakıtlara dayalı temiz enerji üretimi ve yeni teknolojilerin uygulamalarına geçilmiştir (Okutan 1999)(Özgürel,Şahin 1994).

### **6.3.2.Temiz enerji üretim sistemleri ve yeni teknolojiler**

Ülkemizin hidrolik enerji kapasitesinin uzun dönemdeki talep artışlarını karşılamaya yetmemesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının henüz gelişme safhasında ve küçük ölçeklerde mümkün olabilmesi nedeniyle ağırlıklı olarak kömür ve doğal gaz olmak üzere fosil yakıtların daha uzun bir süre birincil kaynak olma özelliğini koruyacağı bilinmektedir. Enerji üretiminde verimi artırmaya ve çevreyi korumaya yönelik bazı teknolojiler geliştirilmiştir.

#### **6.3.2.1. Linyitlerin değerlendirilmesi için teknolojiler**

##### **6.3.2.1.1.Toz tutma ve baca gazı arıtma teknolojileri**

Ulusal fosil yakıtlarımızın en büyük bölümünü 8 milyar tonluk rezervi ile linyit teşkil etmektedir. Ülkemizde çıkarılan linyitler çok yüksek küllü, yüksek kükürtlü, yüksek rutubetli ve çok düşük ısı değerlidir. Bu linyitler bir ölçüde, elektrik enerjisi üreten termik santrallerde, pulverize kömürlü öğütme ve yakma sistemleriyle değerlendirilmektedir. Pulverize kömürlü termik santrallerde, santralin dizaynında gerekli toz tutma ve baca gazları arıtma ( FGD) sistemleri öngörülmemişse gerek uçucu küller gerekse kükürt emisyonları doğaya zarar vermektedir (Okutan 1999)(Özgürel,Şahin 1994).

##### **6.3.2.1.2.Akışkan yatakla yakma teknolojisi**

Akışkan yatak teknolojisi, kömür taneciklerinin sıcak akışkanlaştırılmış kum veya kül yatağında yanmasıdır. Kazana verilen primer hava yatak malzemesini ( kül veya kum) akışkanlaştırır ve yatağa alttan ya da üstten beslenen kömür taneciklerinin yanmasını sağlar. Yakıt veya yatak malzemesinin hava ile % 100 teması yüksek

yanma ve kükürt tutma performansını hazırlar. Böylece %90-99 arasında değişen yanma verimi, temiz yanma ve  $SO_x$  'in odasında tutulması imkanları sağlar. Böylece,  $SO_x$  gazları yanma sırasında, kazana püskürtülen kireç taşları ile reaksiyona girer ve  $CASO_4$  (alçı taşı) oluşur. Bu nedenle baca gazında ayrıca bir FGD tesisi kurmaya gerek kalmaz (Okutan 1999)(Özgürel,Şahin 1994).

### **6.3.2.1.3. Entegre kömür gazlaştırma kombine çevrim teknolojisi (IGCC)**

Bu teknoloji, kömürün gazlaştırılması ile elde edilen kömür gazının gaz türbinlerinde yakılarak elektrik üretilmesi prensibine dayanmaktadır. Santral esas olarak aşağıda belirtildiği gibi üç ana bölümden meydana gelmektedir.

- . Basınçlı kömür gazlaştırma ünitesi
- . Gaz türbinleri
- . Buhar türbinleri

Kömürün gazlaştırılması katı haldeki kömürün karbon monoksit ve hidrojenle oluşan sentetik gaza dönüştürülmesi işlemidir. Gazlaştırma ünitesinden çıkan kömür gazının gaz türbinine verilmeden önce gaz temizleme ünitesinden geçirilerek, çevre ve gaz türbinleri için zararlı olan  $H_2S$  ve partikül gibi maddelerden temizlenmesi gerekmektedir (Okutan 1999)(Özgürel,Şahin 1994).

### **6.3.2.2.Doğal gaz ve sıvı yakıt kullanılan enerji üretim teknolojileri**

Elektrik üretiminde kullanılan sıvı yakıtlar, motorin, fuel-oil, nafta ve LPG dir. Bu yakıtlar elektrik üretimindeki iki farklı teknoloji modeliyle kullanılmaktadır.

- a) Sıvı yakıtların tek boyutlu kazanlarda yakılarak önce buhar enerjisi sonra da buhar türbinlerinde elektrik enerjisi elde edilmesi.
- b) Sıvı yakıtların gaz ve dizel motorlarında ve gaz türbinlerinde yakılarak doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesi.

Fuel-oil dışında motorin, nafta, ve LPG 'nin yakılması ile oluşacak gazlarda SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> ve CO değerleri genelde müsaade edilen sınırların altındadır. Fakat bu yakıtlar fuel-oil'e göre elektrik üretiminde pahalıya gelmektedir. Diğer yandan ülkemiz rafinerilerinden çıkan fuel- oil'in kükürt içeriği çok yüksek olup bunların baca gazı arıtma tesisi olmadan kullanılması çevre açısından uygun değildir.

Bilinen özellikleri nedeniyle doğal gaz, günümüzde fosil yakıtlı enerji sistemleri içinde en çok tercih edilen yakıt durumundadır. Doğal gaz, son yıllarda çok hızlı teknolojik gelişmeler göstermiş olan gaz türbinlerinde doğrudan yakılmaktadır. Ancak gaz türbinlerinde basit çevrimde elde edilen verimin en fazla %40 civarında olması nedeniyle daha yüksek termik verimlerin elde edildiği kombine çevrim ve B.I.G.Ü. sistemleri günümüzde en çok uygulanan enerji teknolojileri olmuştur (Okutan 1999)(Özgürel,Şahin 1994).

#### **6.3.2.2.1.Kombine çevrim santralleri**

Kombine çevrim santralleri; düşük yatırım ve işletme maliyeti, yüksek verim, kısa tesis dönemi, minimum çevresel etki, düşük baca gazı emisyonu, fuel-oil'den doğal gaza kadar geniş yakıt kullanım olanağı, düşük soğutma suyu ihtiyacı, işletmede basitlik ve kolaylık, yüksek güvenilirlik gibi avantajları nedeniyle günümüzde en çok tercih edilen üretim sistemlerindedir.

Kombine çevrim terimi esas itibariyle gaz türbin çevrimi ve buhar çevriminin bir sistem içine alınarak birbirini tamamlayıcı şekilde çalıştırılmasını ifade etmekte olup, genel prensibi gaz türbin çevriminden çıkan egzoz gazlarının yüksek dereceli ısısının su / buhar çevriminde kullanılarak ek bir enerji üretiminin sağlanmasıdır.

Kombine çevrimlerde birincil olarak elektrik üretimi sağlanmakla birlikte, istenirse çevrimden ara buhar alınarak santral, bileşik ısı- güç (kojenerasyon) sistemi olarak da çalıştırılabilir. Proses buharı bazı B.I.G.Ü. sistemlerinde buhar türbininden, bazı sistemlerde ise atık ısı kazanından alınmaktadır. Bu özelliği ile kombine çevrimler, ısı - güç üretiminde günümüzde var olan en verimli yöntem konumundadır(Okutan 1999)(Özgürel,Şahin 1994).

### 6.3.2.2.2. Bileşik ısı güç üretim sistemleri

Bileşik Isı Güç Üretim Sistemleri ısı ve elektrik üretiminin birlikte yapılma teknolojisidir. B.I.G.Ü. sistemi dizaynında, gaz türbini ya da gaz motoru ile üretilen elektrikle, egzoz gazlarının kazanda değerlendirilmesi ile elde edilen sıcak su ya da buharın aynı anda ve aynı primer enerji kaynağından üretilmesi prensibine dayanır. Yani başka bir ifadeyle gaz türbininde mekanik ya da elektrik enerji üretiminden artan sıcak egzoz gazları atmosfere atılmak yerine geri kazanılmaktadır. Bugüne kadar geliştirilen gaz türbini ya da gaz motoru teknolojileri ile, primer enerjinin üçte biri elektrik enerjisine çevrilmekte kalan üçte ikisi de (%10 'luk baca kayıplarının dışında) kazana geri kazanılmaktadır. Böylece çevrim verimi %90 'lara kadar ulaşabilmektedir.

Yapılan hesaplamalar B.I.G.Ü. sistemlerinin kömür santrallerinin dörtte biri, fuel-oil yakıtlı santrallerin üçte biri ve kombine çevrim santrallerinin yarısı kadar CO<sub>2</sub> gazı ürettiğini göstermektedir. Bileşik Isı Güç Üretim uygulamalı kombine çevrim sistemleri, verimlilik oranının en yüksek olduğu sistemlerdir ve verimlilikleri %85-90' lara ulaşmaktadır (Okutan 1999)(Özgürel,Şahin 1994).

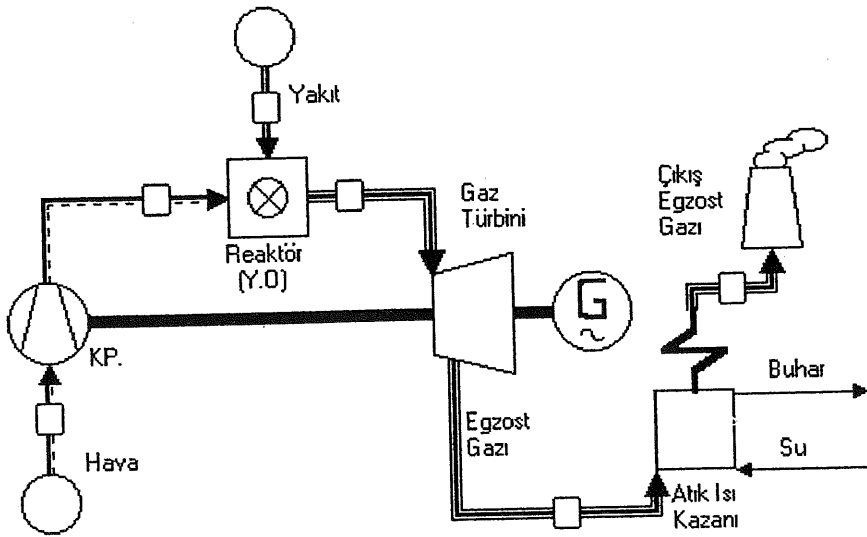
## BÖLÜM 7

### ELE ALINAN ÖRNEK TESİSİN MODELİNİN OLUŞTURULMASI VE SİMÜLASYONU

Bu bölümde Bileşik Isı Güç Üretim sistemlerinin daha verimli ve kontrollü işletilmesi için kontrol metodlarının sistem üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Bu çalışma yapılırken önce ele alınan sistemin modeli oluşturulmuştur.

#### 7.1. Tesisin Tanıtımı

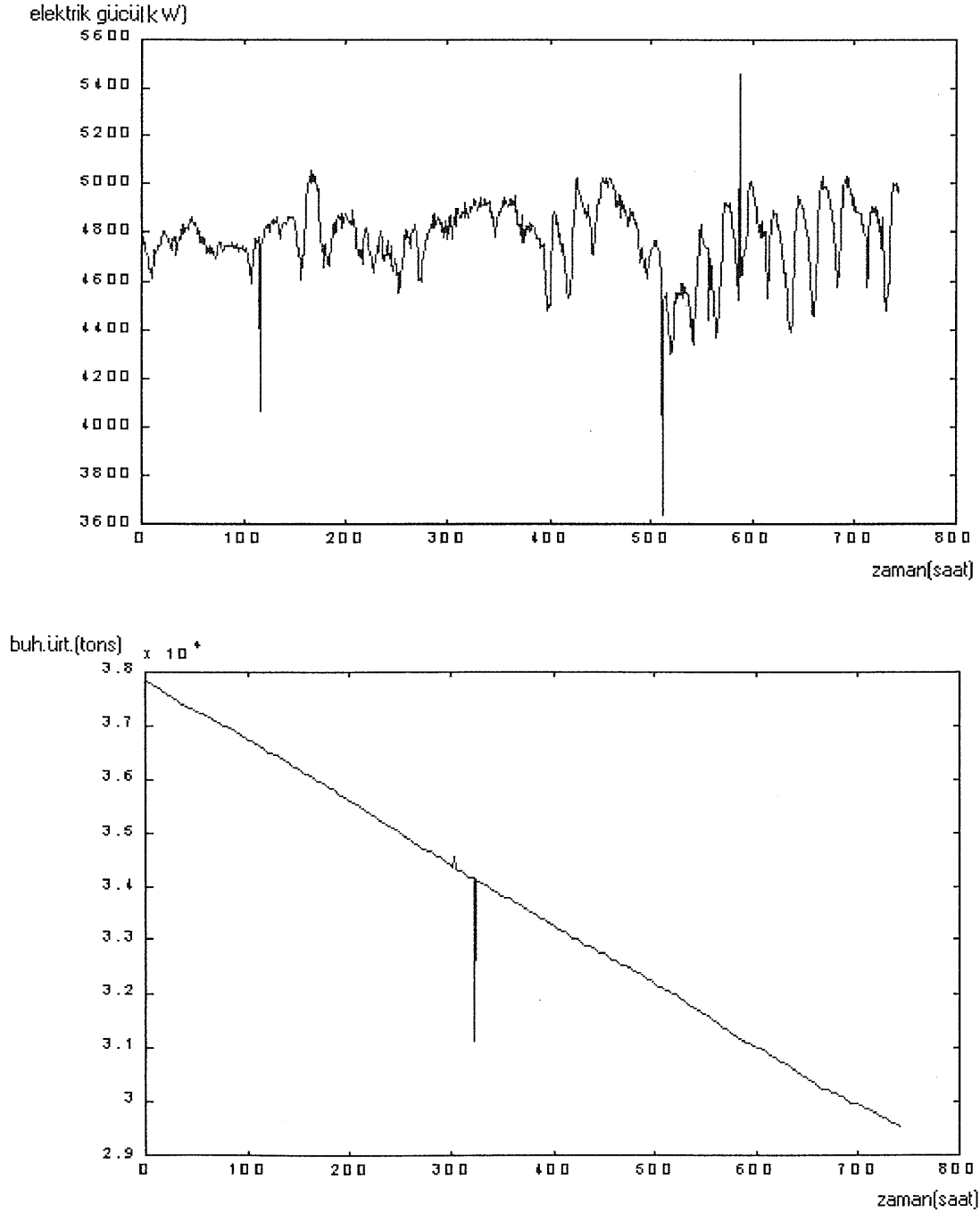
Bu bölümde kullanılan datalar, bir endüstriyel tesisin kojenerasyon santraline ilişkin bir aylık verileridir. Bu tesisi bir model olarak basitçe Şekil 7.1.'deki gibi gösterebiliriz.



Şekil 7.1. Ele Alınan Tesisin Basit Modeli



Bu santraldeki dizayn kriterleri, elektrik üretim kapasitesi, proses buhar basıncı ve sıcaklığı gibi değerlerdir. Kullanılan datalar zamana bağlı olup, ortam koşulları altında alınmıştır (EkA). Şekil 7.2.'de sistemin elektrik güç talebi ve buhar üretimi, zamana bağlı olarak grafik halinde verilmiştir.



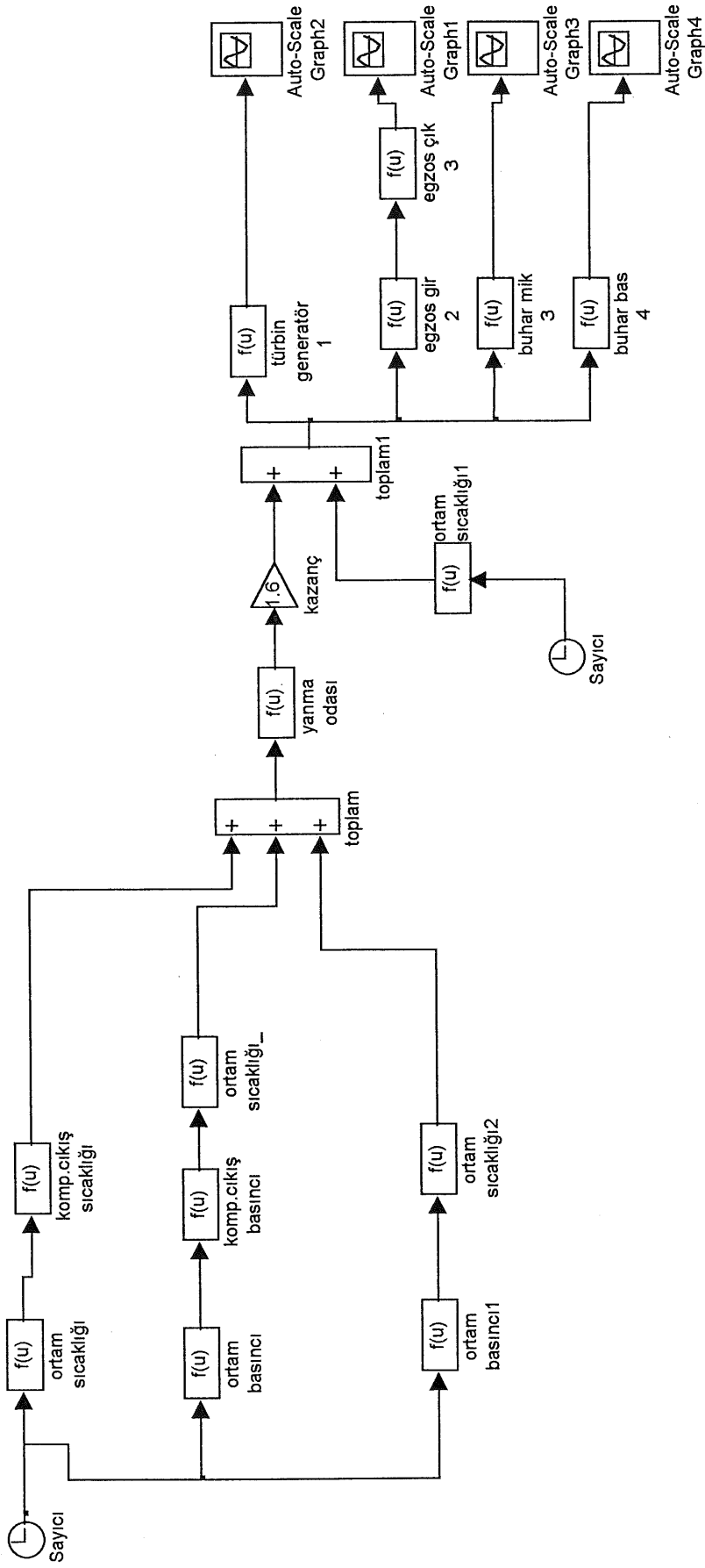
Şekil 7.2. Ele Alınan Tesise İlişkin Güç ve Buhar Talebi Eğrileri

## 7.2. Tesisin Modellemeye İlişkin Yapılan Çalışma

Bu bölümde yapılan çalışma şunlardır:

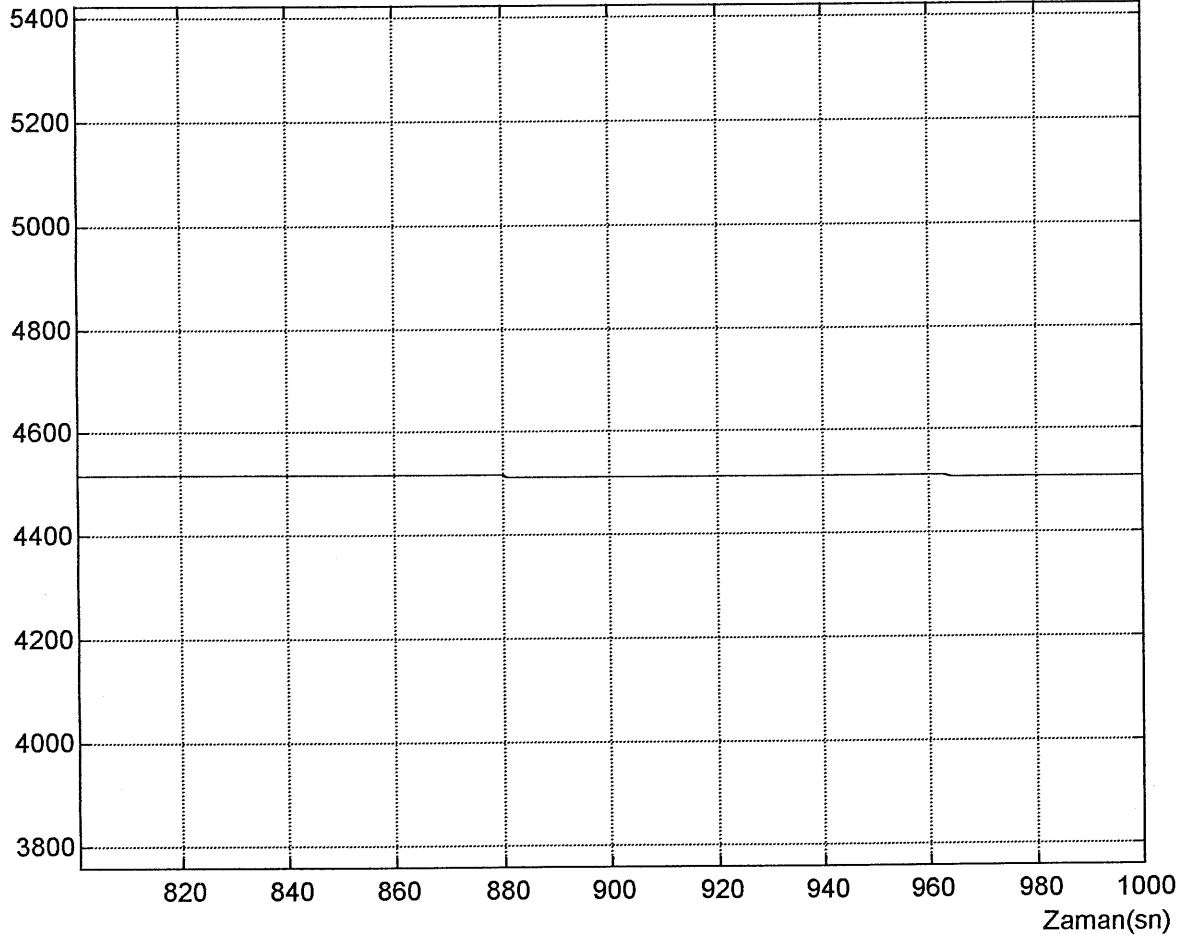
Pakmaya fabrikasının kojenerasyon santraline ilişkin bir aylık sürede alınan saatlik datalar kullanılmıştır. Saat başı alınan bu datalar Ek A'da verilmiştir.

Bu datalardan Matlab bilgisayar programı kullanılarak faydalanılmıştır. Öncelikle sistem, blok şemalarla ifade edilebilir hale getirilmiştir. Burada izlenen yol rakamlar arasında ilişki kurmaya dayanmaktadır. Örneğin; kompresöre giren havanın sıcaklığı ile çıkışta ulaşacağı sıcaklık arasında fonksiyonel ilişki kurarak bu değişkenleri birbirleri cinsinden ifade etmeye dayanır. Sistem bloklar haline getirildikten sonra her bir blok için giriş dataları ve çıkış dataları Matlab'a aktarılır ve  $\text{polyfit}(x,y,*)$  komutu kullanılarak fonksiyon elde edilir. bütün bloklarfonksiyonlarla ifade edilebilir duruma getirilir. Bu durumda elektrik üretimi, buhar üretimi gibi istediğimiz sonuçların yaklaşık değerlerini görebiliriz(Şekil 7.3.).



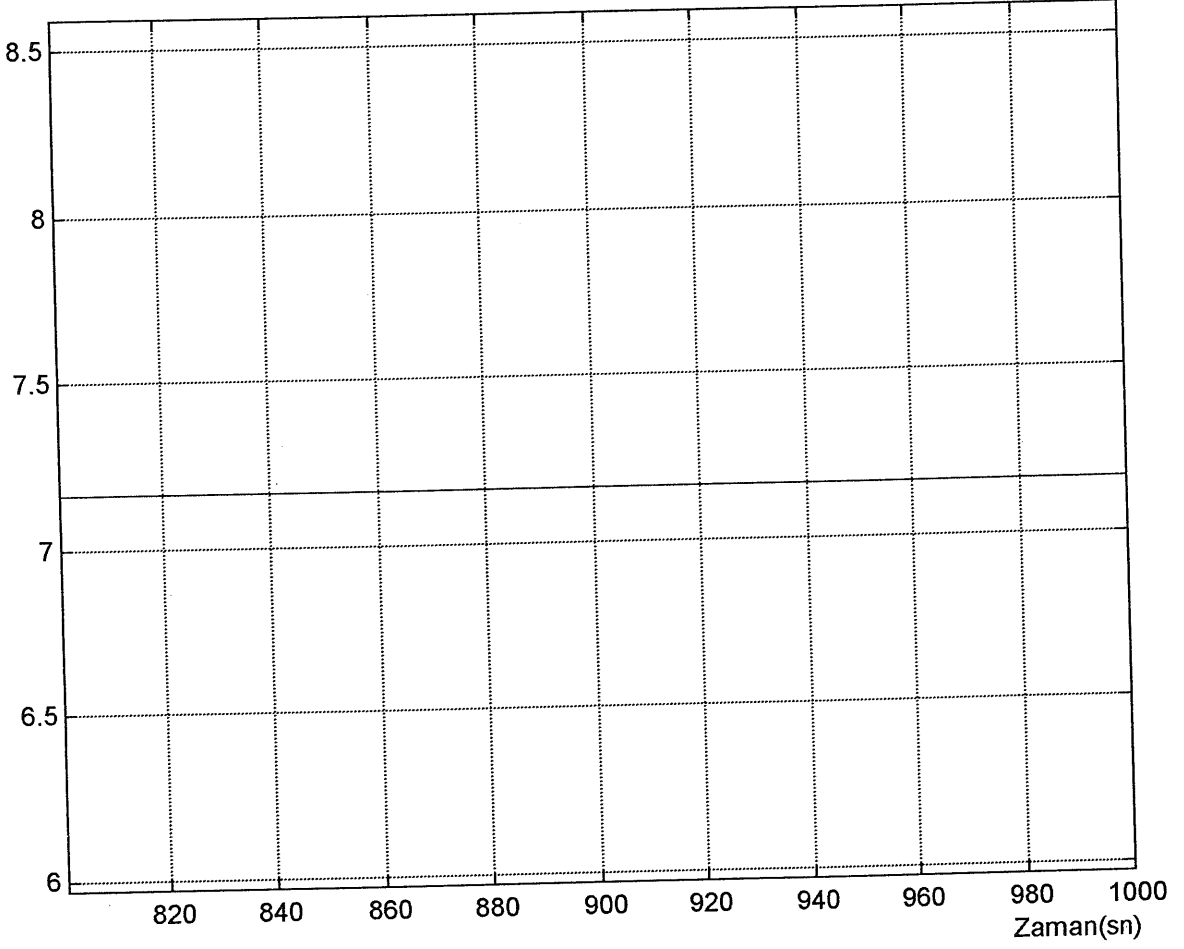
Şekil 7.3. Sistemin Fonksiyon Blok Diyagramı

Elektrik Üretimi(kw)

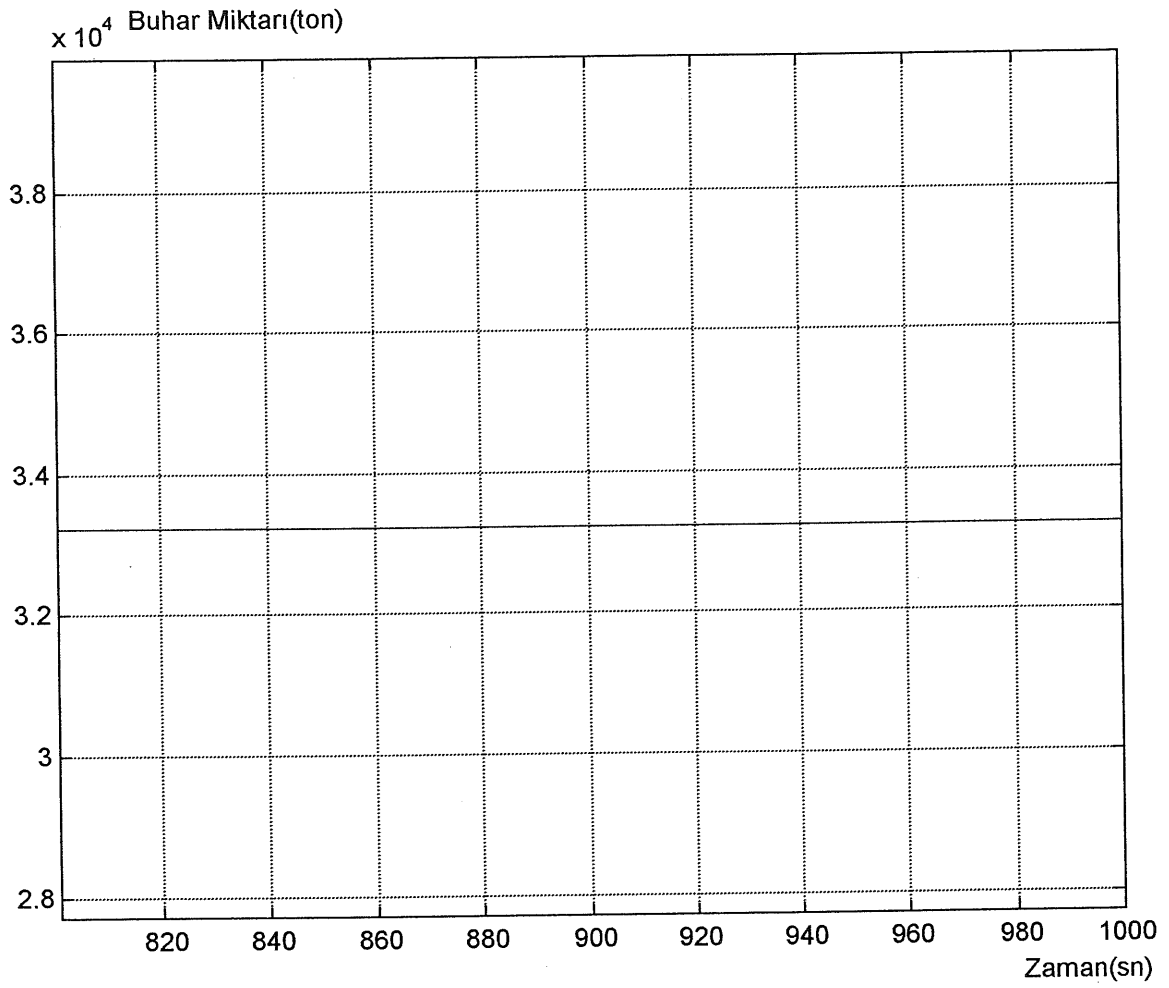


Şekil 7.4. Sistemin Ortalama Elektrik Üretim Miktarı

Buhar Basıncı(bar)

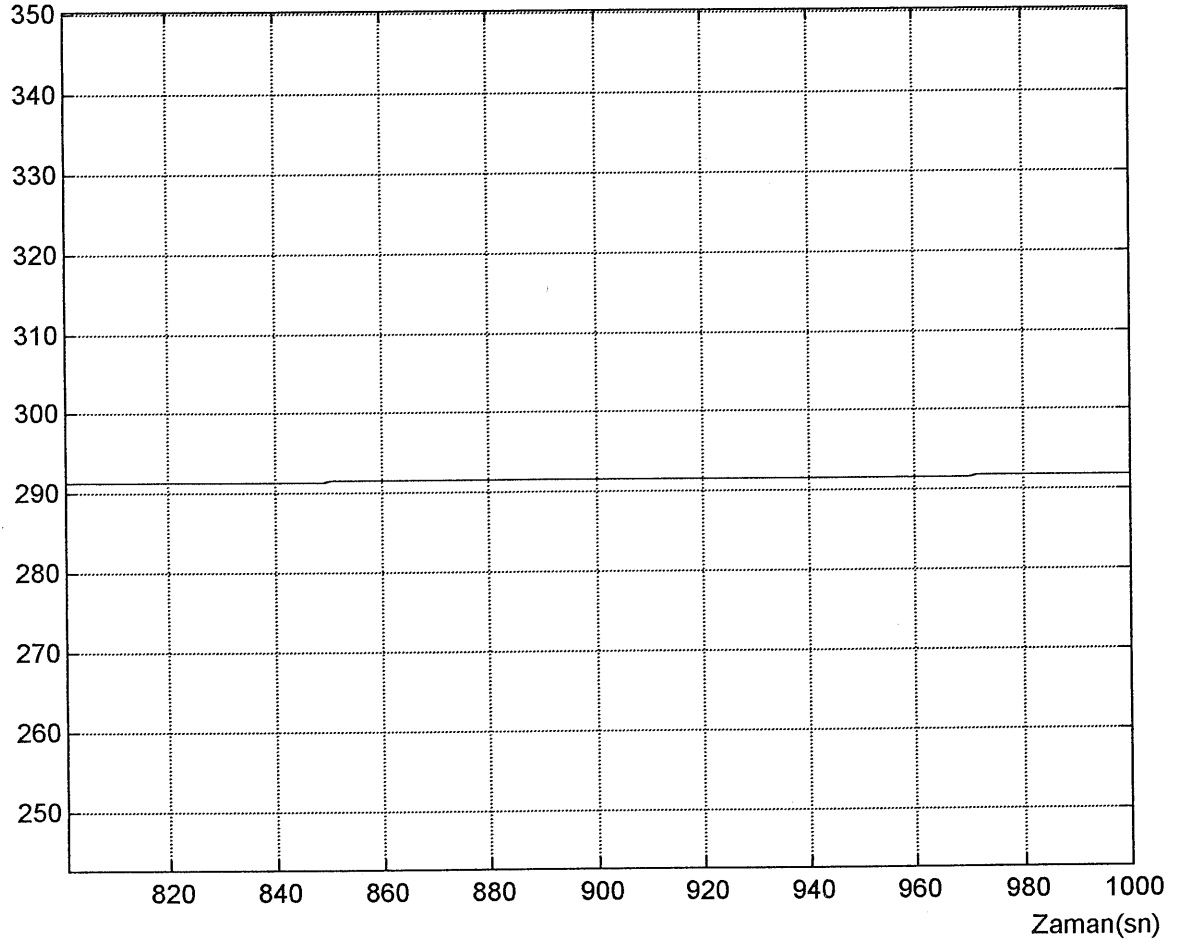


Şekil 7.5. Sistemde Üretilen Buharın Ortalama Basıncı



Şekil 7.6. Sistemde Üretilen Ortalama Buhar Miktarı

Egzos Sıcaklığı(°C)



Şekil 7.7. Sistem Çıkış Egzos Gazı Ortalama Sıcaklığı

### 7.3. S Domeninde Matematiksel Modeli Oluşturulan Tesisin Elektrik Üretim

#### Kontrolü

Denetim sistemi, elemanların karşılıklı şekilde birbirine bağlanmasından meydana gelmektedir. Sistemin elemanları birbirine giriş ve çıkışlar yoluyla bağlanmıştır. Bloklarda sistem elemanlarının işlevleri matematiksel ifadelerle gösterilir. Blok şemalardan yararlanarak sistemin transfer fonksiyonu elde edilir. Bu transfer fonksiyonu incelenerek sistemin kararlı olup olmadığı belirlenir, kararsız ise kararlı hale getirilmeye çalışılır. Ayrıca giriş değişkenlerindeki değerler değiştirilerek çıkışın nasıl etkilendiği incelenebilir.

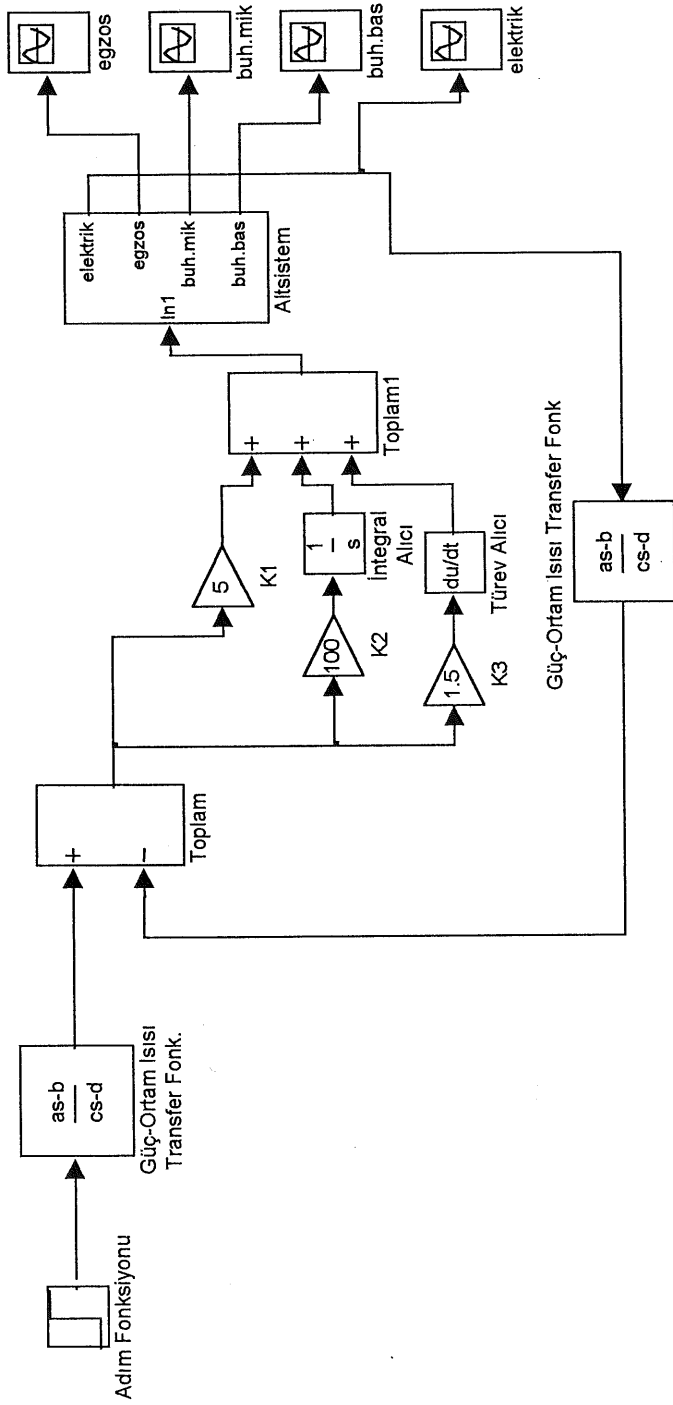
Daha sonra yapılan çalışmada ise, Şekil 7.3'teki blok diyagram kullanılarak, sistem S domeninde ifade edilmeye çalışılmıştır. Örnek olarak; girişi  $x$ , çıkışı  $y$  olan bir blok ele alınmıştır. İstenen giriş ve çıkışlara ilişkin datalar matlab'a aktarılıp  $\text{polyfit}(x,y,*)$  komutu ile fonksiyon belirlenir. Bu fonksiyon  $y = ax + b$  veya  $y = ax^2 + bx + c$  gibi ifade edilebilir. Daha sonra bu olayın tam tersi düşünülür. Yani bu sefer giriş  $y$ , çıkış  $x$  olacaktır. Aynı şekilde  $x = cy + d$  veya  $x = cy^2 + dy + e$  gibi bir fonksiyon elde edilir.  $y = f(x)$  ve  $x = f(y)$  fonksiyonlarının Laplace Transfer Fonksiyonu alınır ve birbirine oranlanarak bu bloğa ilişkin transfer fonksiyonu elde edilir. sistem S domeninde ifade edilmiş olur.

Sistem, Şekil 7.8. de gösterildiği gibi S domeninde ifade edildikten sonra çıkış büyüklüklerinden olan elektrik üretiminin kontrolü yapılmıştır. Sistemin elektrik üretiminde en önemli etkenlerden biri ortam sıcaklığıdır. Eğer türbinin verimini etkileyen bu sıcaklığın çeşitli yöntemlerle soğutularak türbine teması sağlanırsa üretilen elektrik miktarı artacaktır.

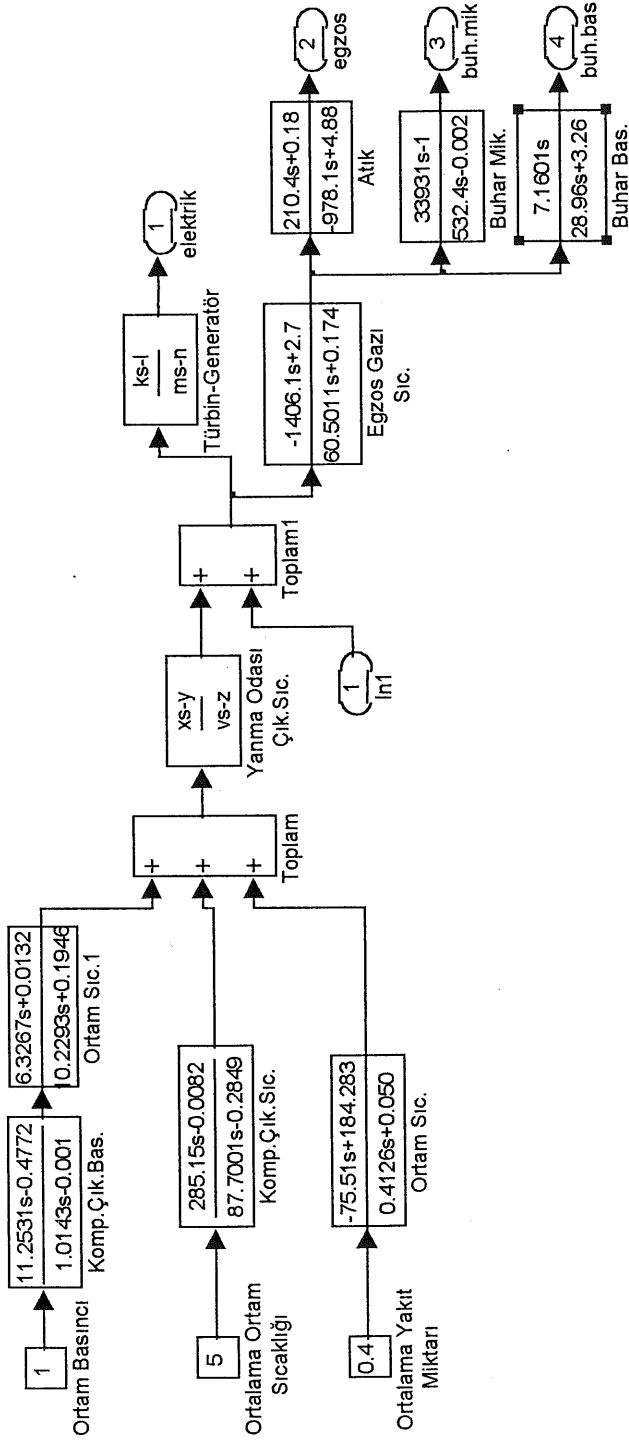
Elektrik üretimi kontrolü yapılırken PID kontrol sistemi kullanılmıştır. Referans olarak istenilen elektriksel güç değeri alınmıştır. Bu elektriksel güç ile ortam sıcaklığı arasında ilişki kuran blok ile güç ısıya dönüştürülmüş ve sistemde üretilen elektriksel gücün ısı karşılığıyla kıyaslanmıştır. Sonuçtaki hata sinyaline uygun olarak sistemin kontrolü sağlanmıştır.

Şekil 7.8 'in içinde yer alan alt-sistem bloğunun ayrıntılı şeması Şekil 7.9.'da verilmiştir.



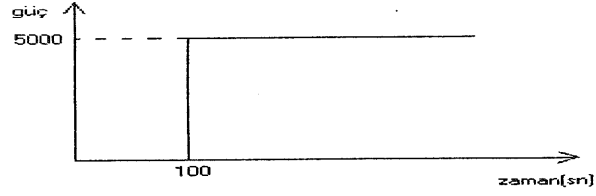


Şekil 7.8. Sistemin S Domenindeki Blok Diyagramı

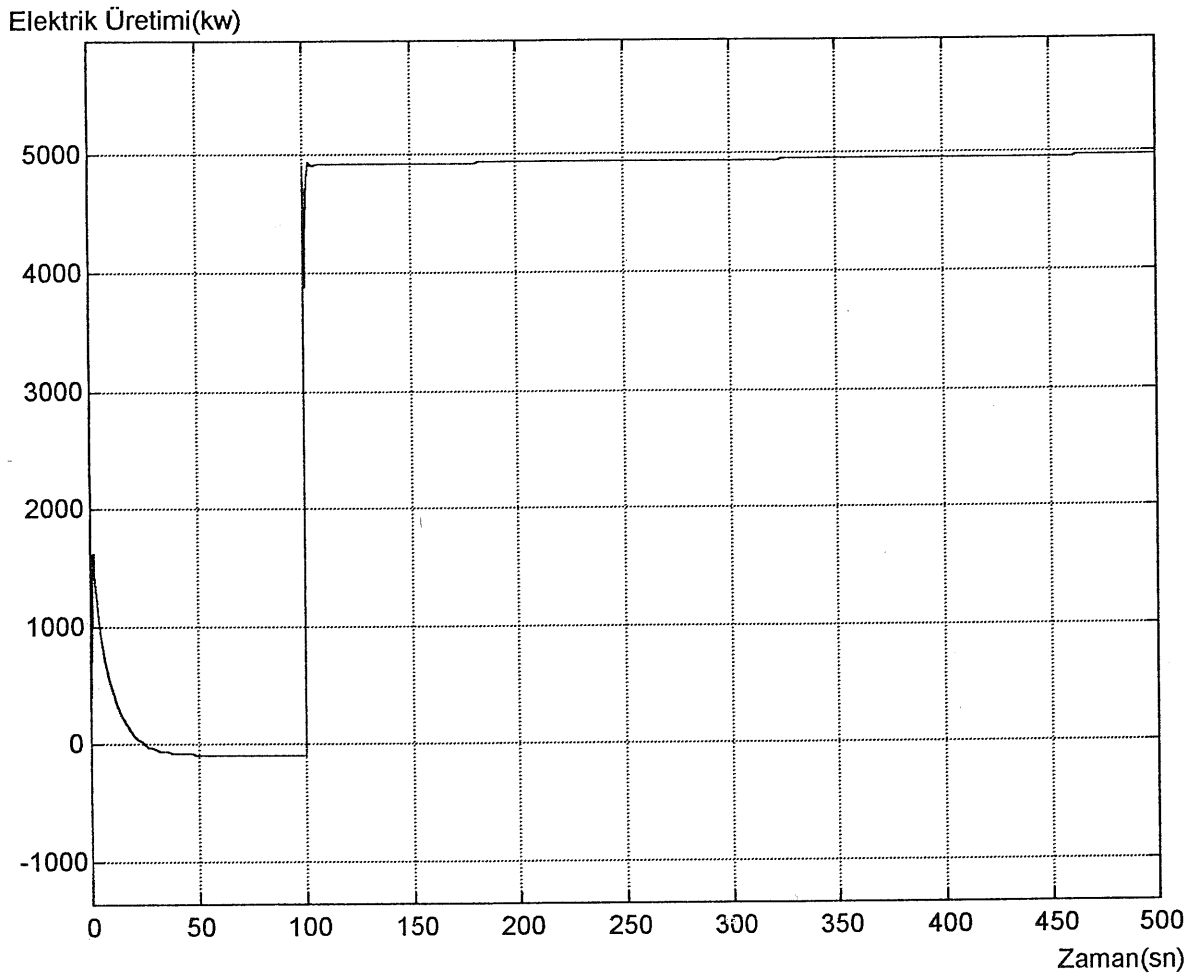


Şekil 7.9. Alt-Sistem Blok Diyagramı

Sisteme uygulanan adım fonksiyonu Şekil 7.10. da gösterilmiştir. Uygulanan bu adım Fonksiyonuna karşılık sistemin cevabı ise Şekil 7.11’de verilmiştir.



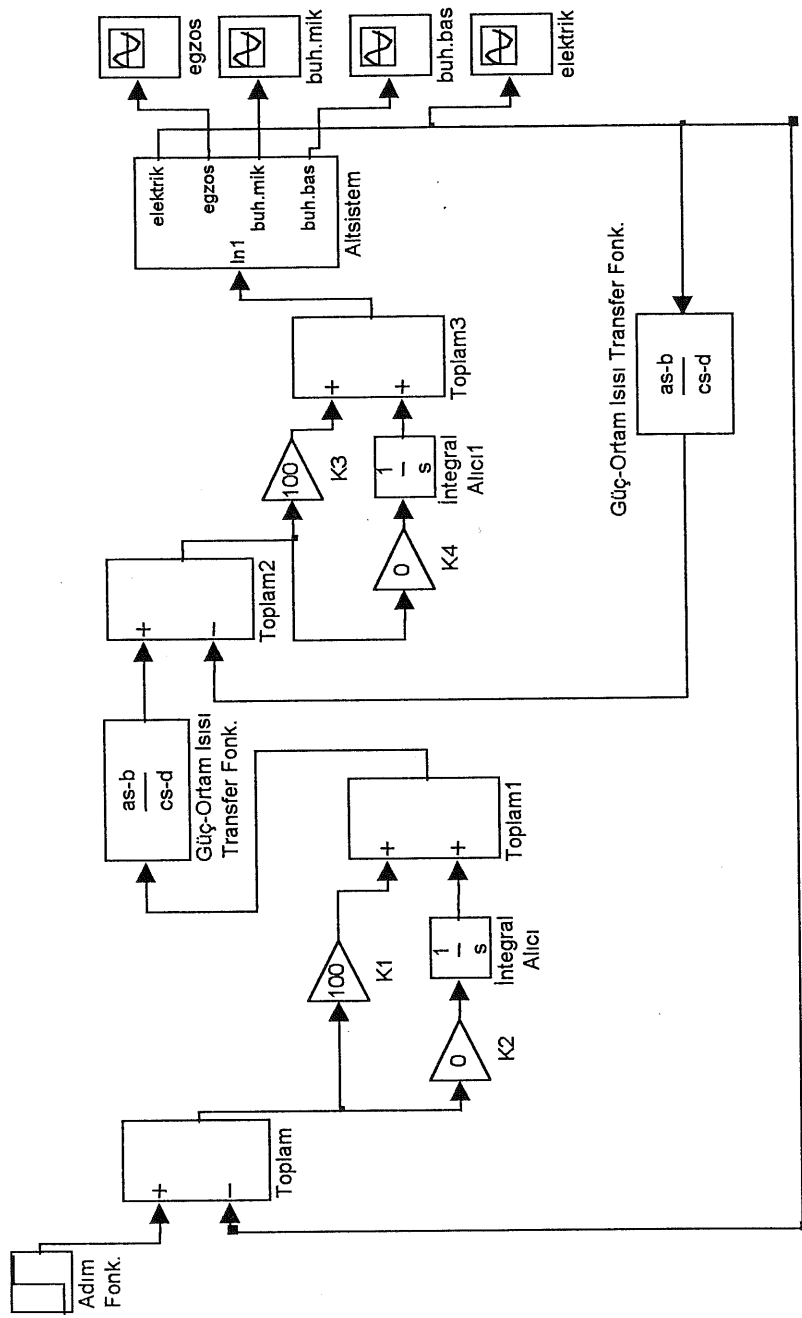
Şekil 7.10. Sisteme Uygulanan Adım Fonksiyonu



Şekil 7.11. Sisteme Uygulanan Adım Fonksiyonu Cevabı

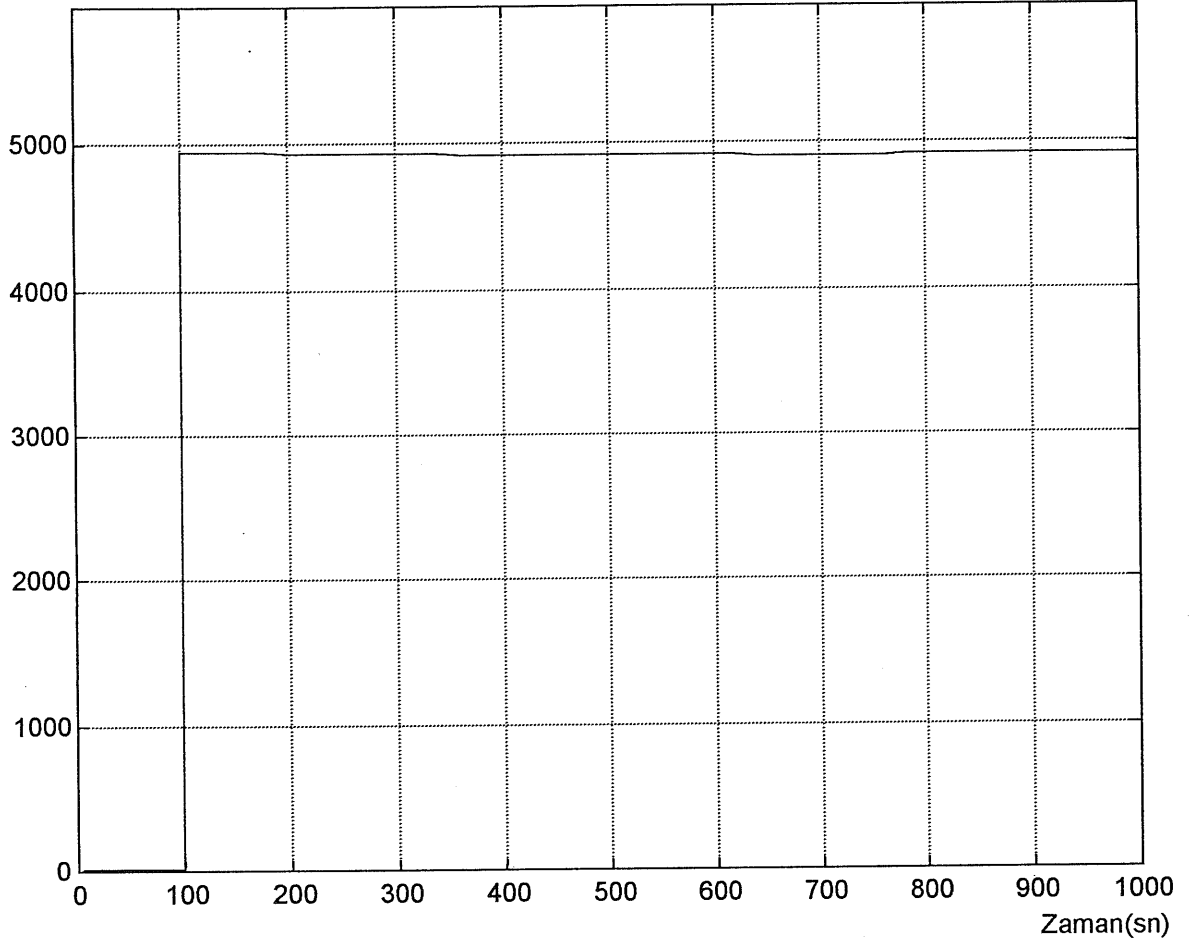
Yapılan bu çalışmada ortam sıcaklığı bozucu etken durumundadır. Bu etki, kullanılan kontrol yöntemi ile tam olarak giderilememiştir. Bu nedenle Şekil 7.12’de görüldüğü gibi kademeli denetim kullanılmıştır. Kademeli denetim genellikle tek-döngülü denetim yolu ile bozucu girişlerin etkisinin giderilemediği durumlarda kullanılır(Ek B). Kademeli denetim temelde, sistem bant genişliğini artıran ve iç döngüye giren bozucunun etkisini azaltan yönde etki gösterir. Bu nedenle sistem Şekil 7.12’de gösterildiği gibi kademeli denetim durumuna getirilerek kontrolü yapılmıştır.

Sistemin elektrik üretim kontrolü için PID denetim elemanı esas alınmıştır. Fakat denetim elemanlarının sistem üzerindeki etkilerini görmek açısından P, PI ve PID denetim elemanları aynı sisteme uygulanarak kontrol edilen büyüklük gözlenmiştir. Şekil 7.13’te yalnızca P tipi denetim elemanı kullanılmıştır.



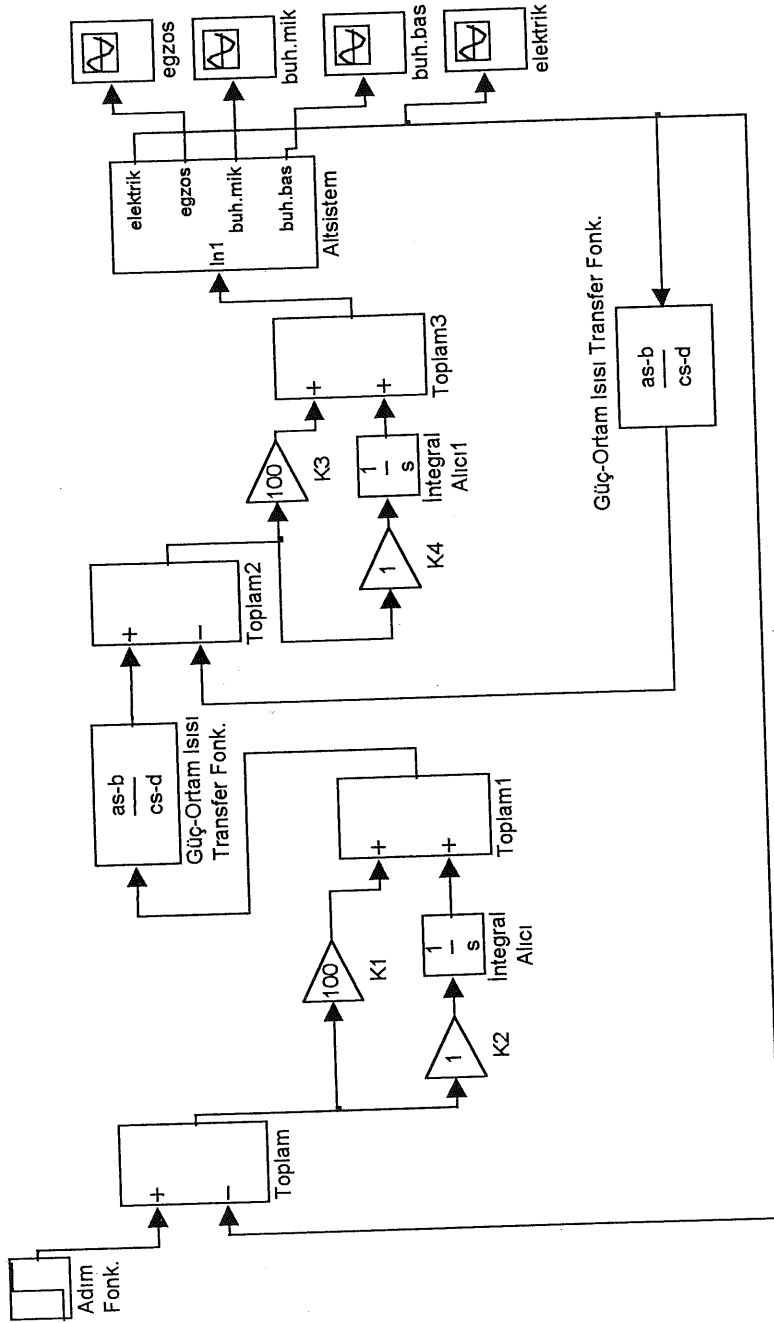
Şekil 7.12. Sistemin Kademeli Denetim Diyagramı

Elektrik Üretimi(kw)

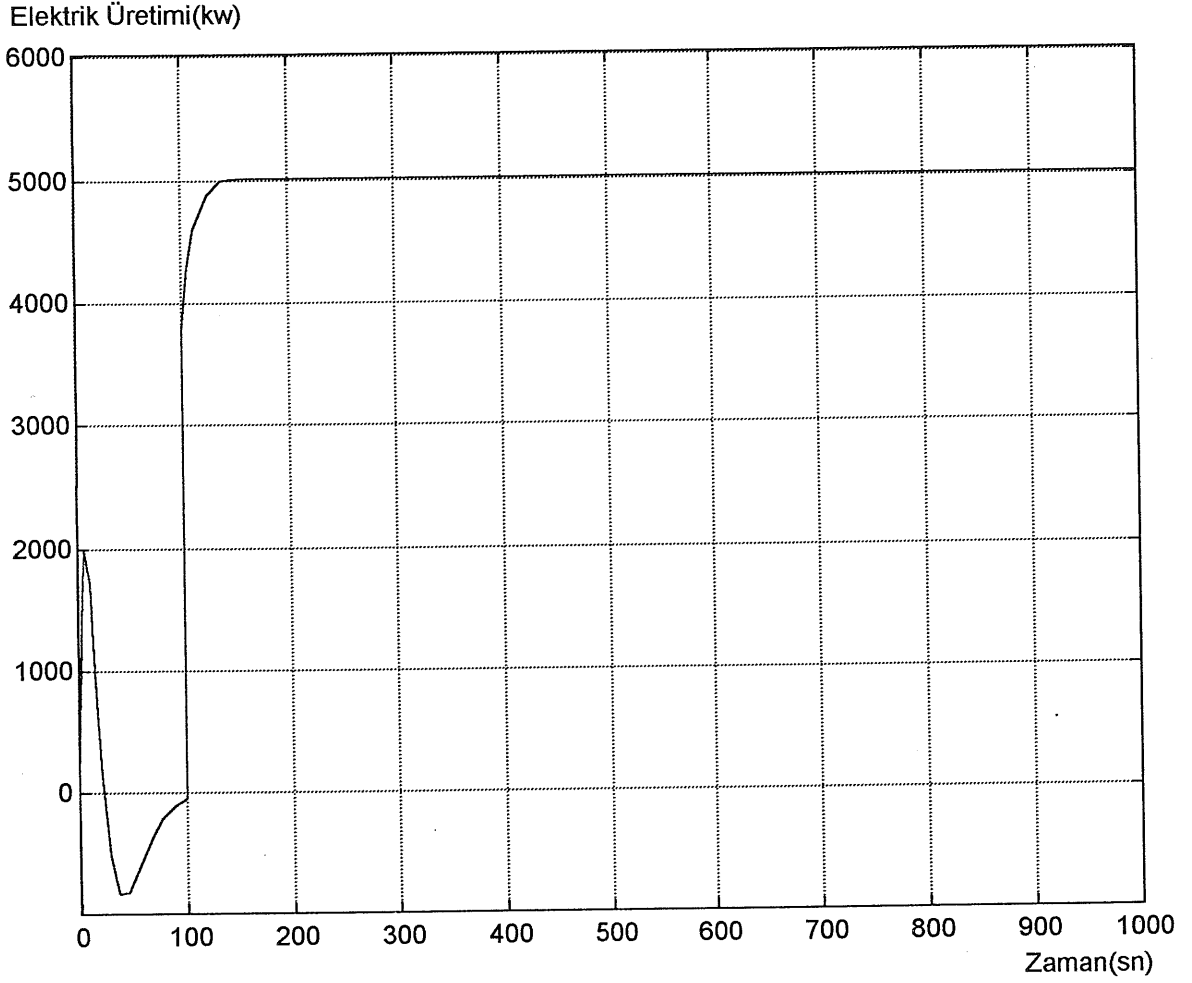


Şekil 7.13.P Tipi Denetim Sonuç Eğrisi

Bu durumda değişimini gözlediğimiz elektriksel büyüklük Şekil 7.13.'te görüldüğü gibi ayar değerine tam oturmamıştır ve belli bir hata ile çalışmaktadır. Şekil 7.14'te ise PI tipi denetim elemanı kullanılmıştır. Burada ise Şekil 7.15'te görüldüğü gibi çıkış, ayar değerine belli bir süre sonra oturmaktadır, hata giderilmiştir.



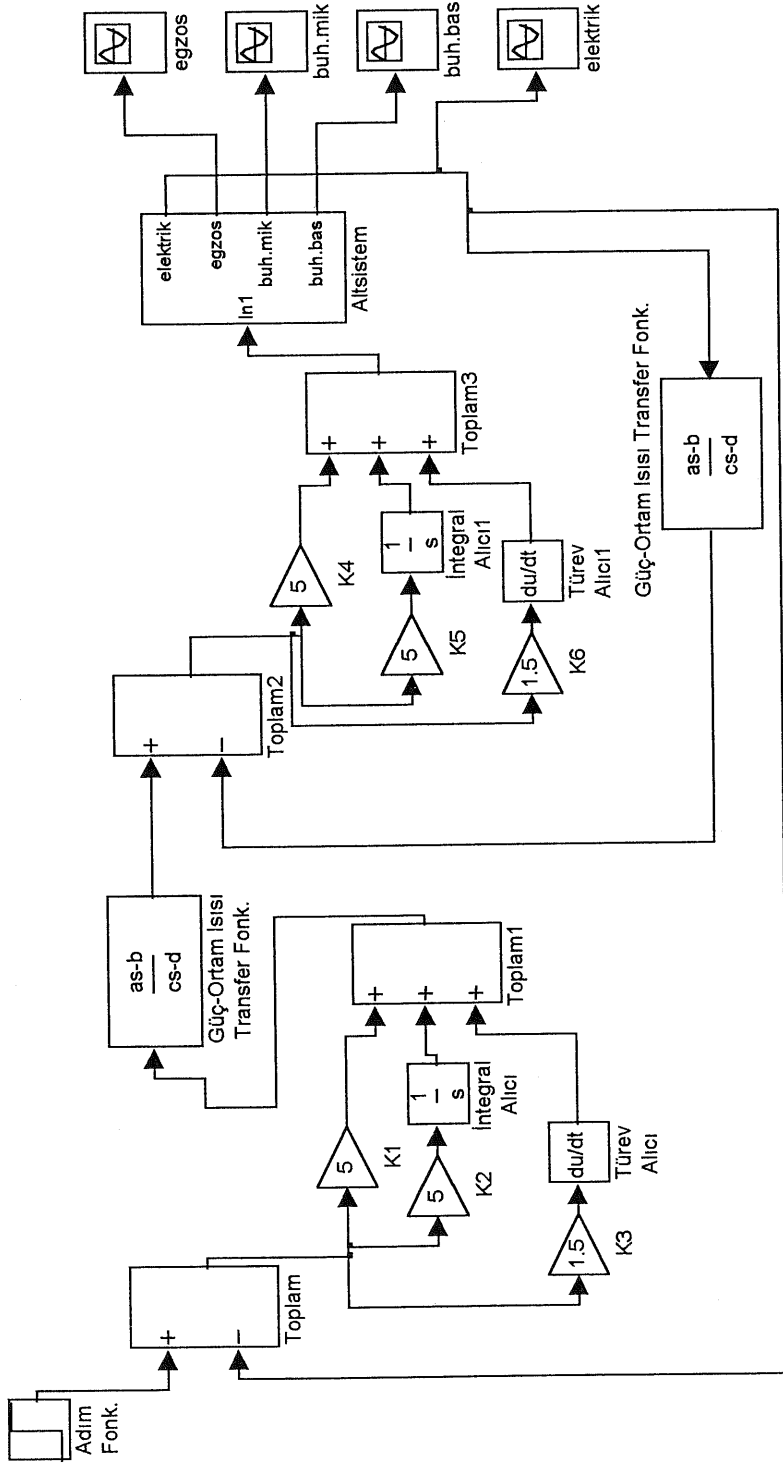
Şekil 7.14. Sistemin PI Denetim Elemanlı Diyagramı



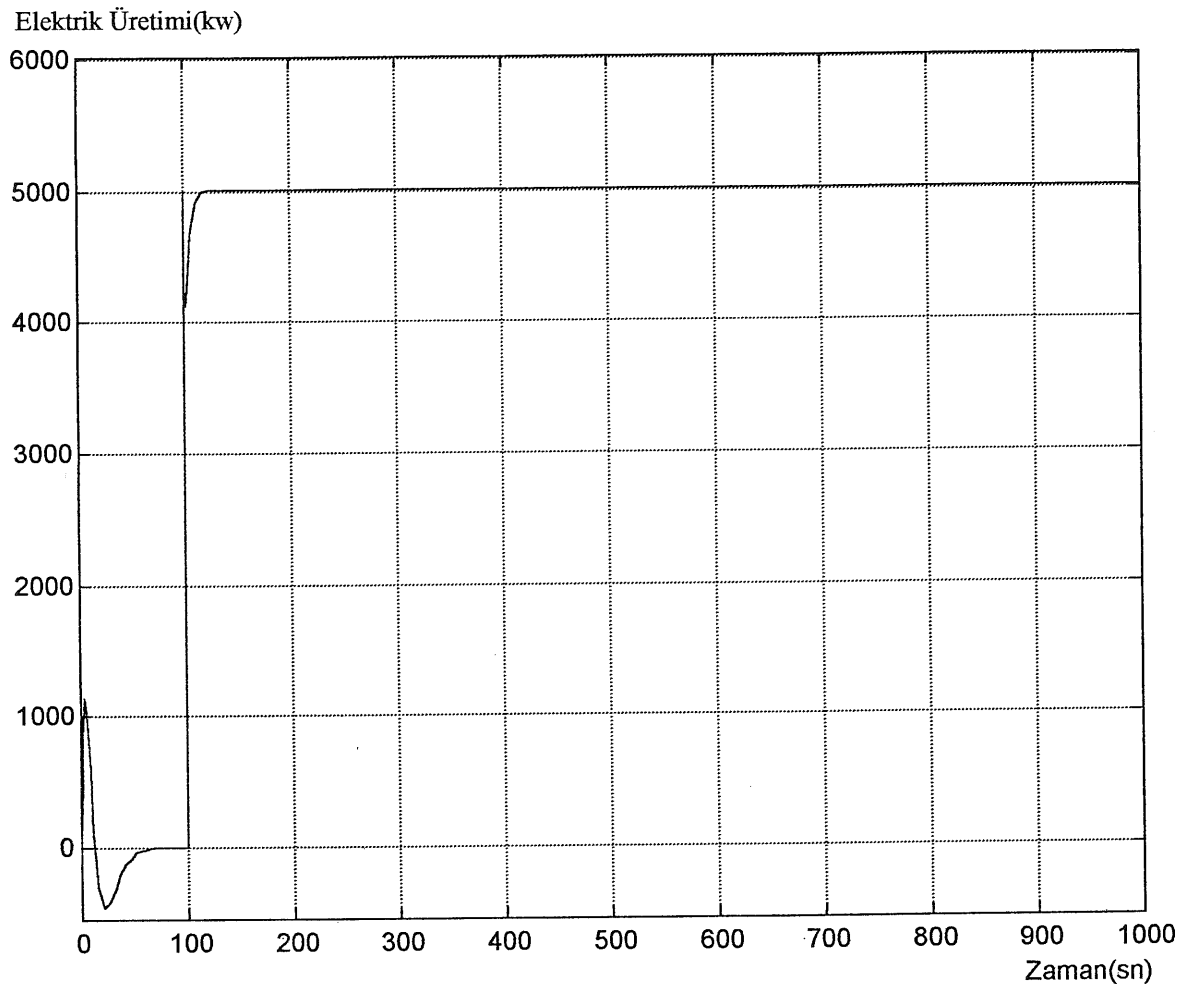
Şekil 7.15. Sistemin PI Denetim Elemanına Cevabı

Şekil 7.16.'da verilen sistemde PID denetim elemanı kullanılmıştır. Sisteme ilişkin çıkış eğrisi Şekil 7.17'de verilmiştir. Görüldüğü gibi çıkış, ayar değerine kısa sürede oturmuştur. Bu yöntemde hızlı bir cevap sağlanmıştır.





**Şekil 7.16.** Sistemin PID Denetim Elemanı Diyagramı



Şekil 7.17. Sistemin PID Denetim Elemanına Cevabı

## SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Son yıllarda enerji tüketiminin hızla artmasına karşılık enerji kaynaklarının yetersiz kalışı enerji konusunda önemli sorunların olmasına neden olmuştur. Enerji kaynaklarının verimli olarak kullanımının önem kazandığı günümüzde Bileşik Isı-Güç Üretim Sistemleri önemli bir fırsattır. Bazı koşulların oluşması halinde bu sistemlerin kurulmasının önemli avantajları vardır.

Bu koşullar:

- Hem ısı hem elektrik ihtiyacı olan yeni endüstriyel tesislerin kurulması,
- Varolan tesislerde yapılan büyük genişlemeler,
- Eskiyen buhar üretim donanımlarının değiştirilmesi,
- Yakıt ve elektrik enerjisi maliyetlerinde önemli değişikliklerin olması,
- Şebekeye elektrik satış fiyatının doğması,

şeklinde sayılabilir.

Enerji ihtiyacını karşılamak üzere kurulan santraller çevreye oldukça zarar vermektedir. Verilen bu zarar da gün geçtikçe yeni kurulan tesislerle artmaktadır. Zorunlu olan enerji ihtiyacını temiz bir şekilde elde etmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Kullanılan bu yöntemlerin dışında kurulan santrallerin de çalışma itibarıyla çevreye verdikleri zarar farklıdır. Bölüm 6'da da anlatıldığı gibi hem verili hem de temiz enerji üretimi Bileşik Isı-Güç Üretim Sistemleriyle mümkün olmaktadır.

Üretim sistemlerin matematiksel modeli çıkarılarak otomatik kontrolünün sağlanmasının avantajları vardır. Bileşik Isı- Güç Üretim Sistemlerinde elektrik ve ısı üretiminin gerçekleşmesi için çeşitli safhalar vardır. Bu safhalarda önemli etkisi bulunan sıcaklık, basınç, hız gibi etkenlerin denetimi otomatik kontrol sistemi ile

sağlanır. Kontrol elemanları ile sistemin isteğimiz doğrultusunda kontrollü işlemesi sağlanır. Sistemden istenilen çıkış elde edilebilir. Böylece sistemin daha verimli ve kontrollü işlemesi sağlanmış olur.

Bu çalışmada, ele alınan tesisten daha yüksek verimde elektrik üretimi sağlanması için sistemin kontrol elemanlarıyla çalıştırılması gerektiği gösterilmiştir. Yapılan çalışmada sistem dataları kullanılarak model oluşturulmuş ve PID denetim sisteminden faydalanılarak elektrik üretimi kontrol edilmiştir. Yapılan bu çalışma, ileride daha da geliştirilerek sistemin ihtiyacı olan proses buharının basıncı ve miktarı da kontrol altına alınabilir.

Türkiye'deki enerji ihtiyacı ve çevre sorunları göz önüne alınarak daha verimli ve temiz enerji kullanımı için Bileşik Isı- Güç Üretim Sistemleri'nin yaygınlaşması gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

1. AĞABEY, Ö., April 28-30-1994. Kojenerasyon Teknolojileri . Koç Holding Etüd Proje Koordinatörlüğü, Energy with All Aspects in 21 st. Century Symposium İstanbul.
2. ALBOYACI ,B.,1998. Bileşik Isı-Güç Üretim Sistemlerinin Optimizasyonu. KOÜ Fen Bilimleri Enstitüsü , Yüksek Lisans Tezi,Kocaeli.
3. BAYRAM, M., 1978. Elektrik Tesisleri Dersleri. İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.
4. BRITANNICA,<http://www.britannica.com./bcom/eb/article>
5. DURAL , M.,September 21-22 1999. Kojenerasyon Sistemlerinde Orta Gerilim Tesislerinin Dizaynı ile Şebeke Paralel Çalışma Konfigürasyonu , Man Enerji Sistemleri, 5. International Cogeneration &Environment Conference &Exhibition, İstanbul.
6. EL-WAKİL,M.M., 1984. Power Plant Technology. University of Wisconsin.Mc GrawwHill.Arizona.
- 7.GAZ TÜRBİNİ, 1997. Thomassen International B. V., EğitimElKitabı, Thomassen/General Elektrik,MS6001 .
- 8.GÜNEY,İ., 1993. Elektrik Tesisleri I (Üretim Merkezleri) Marmara Üniversitesi,İstanbul.
- 9.GÜZEL , B.,1997. Kojenerasyon Sistemleri ve Topkapı Şişe San. A.Ş.'de Elektrik Üretilmesi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- 10.HANNET,L.N.,KHAN,A., February 1993. Combustion Turbine Dynamic Model Validation Tests. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.8, No.1.
- 11.KICIMAN ,S., 1997.Bileşik Isı- Elektrik Santralleri ve Enerji Tutumluluğu. MMO Bilimsel ve Teknik Kongresi .
- 12.KOLA,V.,May 1989. Power Plant Model For Operator Training Simulators. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.4, No.2.
- 13.MORAN,M.J.,SHAPIRO,H.N., 1992.Fundamentals of Engineering Thermodynamics. John Willey&Sons,Inc.
- 14.OKUTAN , H., AĞIŞ,Ö.,September 21-22 1999. Kojenerasyonun Çevre Korumaya Katkısı. 5. International Cogeneration &Environment Conference &Exhibition ,İstanbul.

15. ÖZGÜREL, B., ŞAHİN, S., April 28-30 1994. Kojenerasyon (Kombine Isı ve Güç Üretim) . Energy with All Aspects in 21 st. Century Symposium İstanbul.
16. PAKMAYA, 1998. Mayıs Ayı Dataları.
17. SILL,U.; ZÖRNER, W., 1996. Steam Türbine Generators Process Control and Diagnostics. Siemens,München.
18. TURKEY, COGEN,1999. EurepEuropean Cogeneration Review, Chapter 30.
19. TURNA , T., 1994. Caterpillar Gaz Motorlarının ve Gaz Türbinlerinin Bileşik Isı-Güç Sisteminde Kullanımı.
20. TÜRK MİLLİ KOMİTESİ, 1978. Enerji Kullanımı ve Tutumluluğu, Dünya Enerji Konferansı, Türkiye 3. Genel Enerji Kongresi Cilt 2, Ankara.
21. ÇENGEL, Y.A.,BOKS.,M.A.,1989. Thermodynamics An Engineering Approach . Mc. Graw.Hill, Inc.
22. YÜCEL ,F.B.,1978. Enerji Ekonomisi, Türkiye 3. Genel Enerji Kongresi, Ankara.
23. YÜKSEL,İ., 1995. Otomatik Kontrol-Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri. Uludağ Üniversitesi, Bursa.
25. WITZANI, M., August 23-25 1995. Modelling of Cogeneration Power Plants on TimeDependent Power Demands of The Consumer. ASME Cogen-Turbo Power Conference Vienna, Austria.

## EKLER

### EK A

O.S.	K.Ç.S.	K.Ç.B.	E.G.S.	E.Ç.S.	E.Ü.	K.G.B.	E.Ç.S.	Y.M.	B.B.
5	676	10,8	446	147	4786	1	285	0,452	7,5
6	677	10,8	446	144	4756	1,01	287	0,454	7,3
7	675	10,8	446	138	4761	1	284	0,454	6,8
8	677	10,8	446	136	4732	1	282	0,455	7,1
9	676	10,7	447	142	4695	1,013	285	0,457	6,9
10	675	10,7	447	146	4658	1,011	283	0,46	7,4
11	676	10,6	447	149	4635	1	284	0,46	6,9
11	678	10,7	447	149	4648	1	284	0,46	7
11	676	10,6	448	151	4615	1	285	0,46	6,6
11	676	10,7	448	153	4629	1	285	0,456	7,5
9	676	10,8	447	148	4703	1,013	285	0,455	7,3
8	677	10,8	447	145	4733	1,013	287	0,454	6,6
8	676	10,8	447	146	4715	1	285	0,454	6,8
7	675	10,8	447	147	4743	1	283	0,454	7,4
7	676	10,8	446	159	4749	1	286	0,454	7,2
6	676	10,8	447	151	4744	1	285	0,45	7,7
6	677	10,7	446	150	4751	1	284	0,45	7,3
6	675	10,9	446	150	4753	1	285	0,45	7,3
6	676	10,8	446	146	4770	1	285	0,45	6,9
6	677	10,8	446	153	4803	1,011	286	0,45	7,3
6	676	10,9	446	151	4802	1	284	0,448	7,3
6	676	10,8	446	150	4803	1,013	284	0,45	6,9
6	676	11	446	150	4809	1	284	0,449	7,5
6	676	10,9	447	150	4784	1	284	0,45	7,7
6	675	10,8	446	146	4774	1	284	0,45	7,5
6	676	10,8	446	146	4766	1	286	0,45	7,4
6	677	10,8	447	147	4753	1	286	0,448	7,3
6	675	10,8	447	149	4743	1	284	0,449	7,5
7	676	10,8	450	153	4732	1	285	0,45	7,5
7	676	10,8	446	154	4779	1	285	0,45	7,4
7	676	10,8	446	152	4770	1	285	0,452	7,3
7	677	10,9	446	151	4783	1	286	0,454	7,3
7	676	10,9	446	156	4782	1	284	0,454	6,8
8	676	10,7	445	146	4707	1,011	285	0,458	7,6
8	676	10,8	446	145	4756	1	285	0,458	6,7
7	676	10,7	446	148	4753	1	284	0,45	7,2
7	676	10,8	446	150	4784	1	284	0,45	6,7
7	676	10,8	446	148	4774	1,012	285	0,45	6,6
5	677	10,8	446	148	4815	1,012	285	0,44	6,4
5	675	10,8	446	149	4795	1	286	0,443	7,3
5	676	10,8	446	149	4834	1,013	285	0,45	7,3
5	676	10,9	446	148	4808	1	285	0,44	6,7
5	676	10,8	446	153	4818	1	285	0,44	7
5	675	10,8	445	143	4814	1,01	286	0,45	6,9
4	676	10,8	445	148	4828	1	285	0,44	7,3
4	677	10,9	445	155	4856	1	285	0,44	7,3
3	676	10,8	445	152	4841	1	285	0,43	7,3
4	677	10,8	445	153	4867	1	286	0,45	7,1

3	676	10,8	445	150	4832	1	286	0,43	6,3
4	676	10,9	445	149	4836	1	285	0,45	7,1
4	676	10,8	445	149	4842	1	285	0,45	7,4
4	676	10,9	445	147	4834	1	285	0,45	6,3
4	677	10,8	445	152	4814	1	285	0,45	7,2
5	677	10,8	445	148	4796	1	286	0,45	6,4
5	676	10,8	445	158	4802	1	286	0,45	7
5	676	10,7	445	149	4764	1,01	286	0,47	6,3
5	676	10,7	445	146	4764	1	285	0,47	6,8
5	676	10,7	445	149	4785	1	286	0,446	6,9
4	676	10,8	446	155	4758	1,013	285	0,45	7,4
4	676	10,8	446	145	4786	1,011	287	0,45	7,2
5	676	10,8	445	150	4771	1	284	0,46	6,7
6	677	10,6	446	154	4732	1	285	0,46	7,6
6	676	10,7	447	148	4713	1	285	0,46	7
6	677	10,7	446	147	4739	1	285	0,46	7,2
6	676	10,6	446	146	4726	1,013	284	0,458	6,9
5	675	10,8	446	153	4743	1,013	284	0,444	7,4
6	676	10,7	447	145	4716	1	285	0,445	6,7
6	676	10,7	446	145	4738	1	285	0,443	7,4
7	675	10,6	446	150	4716	1	285	0,445	7,1
6	676	10,7	447	142	4724	1	287	0,444	6,9
6	676	10,6	447	148	4713	1	285	0,444	7,4
6	677	10,6	447	150	4698	1	286	0,44	7,3
6	675	10,7	447	151	4727	1	285	0,45	7
6	676	10,6	446	146	4751	1,011	285	0,45	6,6
6	676	10,7	447	149	4759	1	284	0,45	7
6	676	10,8	446	147	4759	1,013	285	0,45	6,6
6	676	10,7	446	145	4761	1	285	0,45	6,6
6	676	10,7	446	151	4752	1	286	0,45	7,3
6	675	10,6	446	142	4730	1	284	0,46	7,2
7	676	10,7	447	152	4728	1	284	0,458	6,5
7	676	10,7	447	150	4730	1	285	0,459	7,1
7	676	10,7	447	148	4743	1	285	0,45	7,1
7	676	10,7	447	152	4748	1	284	0,457	7,4
7	675	10,8	446	152	4741	1	284	0,45	6,5
7	676	10,6	451	150	4744	1	286	0,446	7,5
7	676	10,8	447	147	4744	1	284	0,448	7,4
7	676	10,8	446	145	4759	1	285	0,447	7,3
7	676	10,8	447	145	4749	1,011	285	0,45	7
6	677	10,7	449	155	4739	1	285	0,449	7,5
6	677	10,8	447	152	4742	1	286	0,448	7,3
6	676	10,7	447	150	4737	1	284	0,449	7,4
7	677	10,7	446	146	4758	1,012	285	0,45	7,1
7	676	10,7	446	150	4746	1,012	285	0,451	7,5
7	677	10,6	446	153	4727	1	286	0,452	7,1
6	677	10,7	446	151	4740	1,013	286	0,44	7
6	677	10,7	446	152	4738	1	285	0,442	7,5
6	676	10,7	446	154	4744	1	285	0,442	6,9
6	676	10,8	446	144	4736	1,01	286	0,442	7
6	675	10,6	446	145	4728	1	285	0,44	6,8
7	675	10,6	446	150	4730	1	285	0,446	6,8
7	676	10,7	446	149	4735	1	285	0,446	7,1
7	676	10,7	446	142	4727	1	286	0,448	6,3



7	676	10,7	446	153	4715	1	285	0,448	7
8	676	10,6	447	156	4687	1	285	0,45	7,2
9	677	10,6	447	154	4671	1	285	0,45	7,3
9	676	10,7	447	149	4655	1	286	0,45	7,3
10	676	10,5	447	144	4591	1	286	0,46	6,4
9	676	10,6	450	147	4625	1	285	0,455	7,4
7	676	10,7	447	139	4695	1,011	285	0,446	6,9
5	676	10,7	446	144	4773	1,01	285	0,43	7,4
5	676	10,8	446	146	4767	1,013	285	0,43	7,4
5	677	10,7	451	149	4760	1	286	0,43	7,5
5	676	10,7	450	150	4764	1	286	0,43	7,6
4	675	10,8	446	151	4784	1	286	0,425	7,3
4	676	10,7	445	156	4751	1	285	0,425	7,6
5	614	10,4	419	150	4062	1	286	0,43	7,5
6	676	10,7	446	151	4742	1,01	284	0,44	7,1
5	676	10,8	446	152	4779	1	285	0,438	7,2
5	676	10,8	446	149	4776	1	285	0,43	6,9
5	675	10,7	446	149	4785	1,013	285	0,43	7,4
4	677	10,8	445	146	4814	1,011	284	0,423	6,4
4	676	10,8	445	142	4829	1	284	0,423	6,5
4	677	10,7	445	153	4807	1	285	0,425	7,3
4	676	10,9	446	151	4823	1	285	0,425	7,3
4	676	10,9	445	149	4849	1	285	0,425	6,7
4	677	10,8	446	152	4844	1,013	287	0,425	6,8
4	676	10,9	446	146	4857	1,013	285	0,425	6,8
4	677	10,8	446	142	4837	1	286	0,42	6,8
4	676	10,8	446	150	4845	1	285	0,42	7,2
4	676	10,8	446	149	4850	1	285	0,42	7,5
4	676	10,8	445	145	4846	1	284	0,42	7
4	677	10,9	446	141	4866	1	285	0,42	7,4
5	677	10,8	446	148	4817	1	285	0,44	7,3
6	676	10,8	446	148	4771	1	286	0,443	7,3
6	676	10,8	446	159	4810	1,011	284	0,445	6,9
5	677	10,8	446	151	4823	1	284	0,445	7
5	676	10,8	446	145	4840	1,013	285	0,43	7
4	677	10,8	450	144	4843	1	285	0,428	7,4
5	676	10,9	446	141	4843	1	284	0,432	7,3
5	676	10,9	448	155	4841	1	284	0,432	7,3
5	676	10,8	446	148	4833	1	286	0,431	7,1
5	676	10,8	446	143	4862	1	284	0,43	7,4
5	677	10,9	446	143	4861	1	285	0,43	6,9
5	676	10,8	446	144	4861	1	285	0,43	7,5
5	676	11	446	154	4866	1	285	0,43	7,3
5	676	10,8	446	149	4862	1	286	0,43	6,9
5	676	10,9	446	150	4866	1	284	0,43	7,7
5	675	10,9	446	148	4863	1	285	0,43	7,1
6	675	10,9	446	140	4841	1,011	285	0,438	7,2
6	676	10,9	446	139	4816	1	286	0,44	7,4
7	676	10,9	446	148	4807	1	286	0,445	7,5
8	676	10,9	447	147	4765	1	285	0,45	6,9
10	677	10,7	447	151	4718	1,012	285	0,48	7,3
10	676	10,7	447	151	4702	1,012	286	0,48	6,9
10	675	10,7	447	153	4688	1	285	0,478	7,3
10	676	10,7	448	145	4602	1,013	285	0,475	6,7

10	676	10,7	447	145	4711	1	285	0,478	7,3
10	676	10,7	447	147	4706	1	286	0,478	7,3
8	676	10,8	447	153	4779	1,01	285	0,46	7
5	676	10,9	446	148	4861	1	285	0,43	7,4
3	676	11	445	152	4936	1	285	0,42	7,4
0	677	11	449	149	5031	1	286	0,41	7,4
-2	676	11,1	444	154	5013	1	286	0,4	7
-2	677	11,2	443	149	5054	1	285	0,4	7,4
-2	675	11	444	156	5008	1	285	0,41	7,4
-1	677	11	444	150	5015	1	285	0,41	7,4
-2	676	11,1	444	148	5044	1	285	0,4	7,4
-1	676	11,1	444	153	5012	1	286	0,4	7,3
0	677	11,1	445	156	5031	1	286	0,41	7,5
1	677	11,1	445	149	4980	1	286	0,42	7,3
1	675	11,1	445	156	4986	1,01	285	0,418	7,6
2	677	10,8	446	152	4859	1	286	0,421	7
3	676	10,9	446	149	4832	1	284	0,425	7,5
4	677	10,8	446	152	4792	1,013	285	0,428	7,1
6	675	10,7	447	157	4727	1,011	285	0,435	7,4
7	677	10,7	447	146	4735	1	285	0,44	7,3
7	676	10,8	446	153	4751	1	284	0,44	7,1
8	675	10,7	448	145	4656	1	284	0,445	6,8
5	677	10,7	446	151	4757	1	285	0,43	7
6	677	10,6	447	153	4739	1,013	285	0,435	7,1
7	675	10,7	448	151	4675	1,013	285	0,44	7,4
7	676	10,7	446	149	4689	1	287	0,44	7,4
8	676	10,6	448	151	4670	1	285	0,442	6,8
6	676	10,8	447	152	4780	1	286	0,432	7,3
8	674	10,7	447	153	4752	1	285	0,444	7,2
4	676	10,8	446	152	4821	1	285	0,43	7,4
2	676	10,8	445	149	4836	1	284	0,425	7,4
2	676	10,9	450	150	4844	1	285	0,425	7,6
4	675	10,7	449	142	4795	1,011	285	0,436	7,5
3	676	10,8	452	157	4814	1	286	0,42	7,5
3	677	10,8	446	147	4849	1,013	284	0,421	7,5
3	677	10,9	450	151	4874	1	284	0,42	7,6
2	676	10,8	445	150	4868	1	285	0,418	7,3
2	676	10,9	446	141	4853	1	285	0,418	6,6
2	677	11	446	148	4880	1	284	0,418	6,9
4	676	10,9	446	151	4822	1	284	0,432	7,2
3	677	10,8	446	148	4862	1	286	0,43	7,4
4	675	10,8	446	151	4865	1	284	0,435	7,3
3	676	10,8	446	149	4872	1	285	0,43	7,1
3	676	11	446	148	4877	1	285	0,43	6,7
4	677	10,8	446	150	4841	1	285	0,433	7
4	676	10,7	446	151	4844	1	286	0,436	7,1
4	676	10,8	446	145	4833	1,011	284	0,433	7,3
3	675	10,8	445	150	4848	1	285	0,426	7,4
3	677	10,8	447	151	4834	1	285	0,425	7,2
2	676	10,9	445	147	4898	1	286	0,42	6,6
2	676	10,7	445	151	4839	1,012	286	0,42	7,4
2	676	10,8	445	146	4821	1,012	285	0,42	6,8
4	676	10,7	446	146	4769	1	285	0,428	7,3
6	674	10,7	447	151	4708	1,013	286	0,44	7,3

6	675	10,7	447	150	4708	1	285	0,44	7,1
6	676	10,7	446	150	4730	1	285	0,44	7,4
6	677	10,7	446	146	4709	1,01	285	0,44	7,3
7	677	10,6	447	148	4690	1	286	0,442	6,6
6	677	10,6	449	150	4731	1	285	0,435	7,5
7	676	10,6	447	150	4675	1	285	0,442	7,3
4	676	10,6	446	148	4753	1	285	0,425	7,3
3	675	10,8	449	141	4813	1	286	0,424	7,5
2	676	10,7	446	148	4820	1	286	0,42	6,9
3	677	10,7	448	151	4814	1	285	0,423	7,5
4	677	10,8	446	146	4793	1	285	0,43	7,3
6	676	10,7	447	150	4741	1	285	0,44	6,8
6	677	10,7	447	145	4715	1	285	0,44	7,4
7	676	10,7	447	157	4709	1,011	286	0,442	7,2
7	676	10,6	447	148	4704	1,01	286	0,442	7,5
8	676	10,6	452	144	4672	1,013	286	0,45	7,4
9	676	10,6	452	141	4641	1	285	0,45	7,4
8	676	10,6	447	146	4661	1	286	0,45	7,3
8	676	10,6	447	147	4684	1	284	0,45	7,1
7	676	10,6	448	148	4680	1	285	0,452	7,3
6	677	10,7	447	149	4748	1	285	0,44	7,1
6	675	10,7	447	152	4722	1	285	0,44	7,3
5	675	10,8	446	150	4777	1,012	284	0,435	7,3
5	675	10,8	446	149	4798	1	284	0,435	7,3
4	674	10,8	446	146	4802	1	285	0,43	6,4
5	676	10,7	447	147	4776	1,011	285	0,435	7,4
7	676	10,6	447	146	4688	1,01	285	0,442	7,2
7	675	10,6	447	151	4707	1	287	0,442	7,4
7	675	10,6	447	142	4685	1	285	0,442	7,1
5	675	10,7	450	148	4769	1	286	0,435	7,5
6	676	10,6	447	149	4726	1	285	0,438	7
7	677	10,7	447	151	4694	1	285	0,442	6,9
6	677	10,7	447	146	4748	1	284	0,435	7,2
7	676	10,7	447	147	4678	1	285	0,44	7,2
8	675	10,5	447	148	4644	1	285	0,448	7,4
7	676	10,5	447	148	4660	1,013	286	0,442	7,4
7	674	10,7	447	147	4677	1	284	0,442	7,1
7	677	10,6	447	147	4690	1	284	0,442	7,4
8	677	10,6	450	143	4655	1	285	0,45	7,4
9	677	10,6	448	151	4629	1	285	0,457	7,3
9	675	10,6	453	146	4634	1,01	284	0,457	7,5
11	675	10,5	453	141	4558	1	284	0,475	7,5
10	676	10,5	448	141	4598	1	286	0,47	7,3
9	677	10,4	448	141	4621	1,013	284	0,465	7,3
8	675	10,6	447	139	4679	1,011	285	0,46	6,8
6	677	10,6	450	148	4716	1	285	0,44	7,5
5	677	10,8	446	151	4786	1	285	0,435	6,8
4	676	10,8	446	151	4816	1	286	0,43	7,2
4	676	10,7	447	150	4773	1	284	0,43	7,2
4	675	10,7	447	152	4787	1,013	285	0,43	7,1
5	675	10,8	446	150	4806	1,013	285	0,435	7,2
5	675	10,7	446	150	4780	1	286	0,435	7,2
5	677	10,7	447	150	4768	1	286	0,435	7,2
5	676	10,7	447	150	4739	1	285	0,435	7,4

5	677	10,8	446	144	4799	1	285	0,436	7,1
5	677	10,7	446	145	4808	1	286	0,436	7
4	676	10,8	446	153	4832	1	285	0,43	7
5	675	10,8	446	148	4821	1	285	0,437	7,2
5	676	10,8	447	143	4810	1,011	285	0,437	7,4
6	677	10,7	447	152	4769	1	286	0,44	7,4
7	675	10,6	447	152	4719	1,013	285	0,442	7,3
10	675	10,6	448	150	4606	1	285	0,47	6,7
10	676	10,6	449	149	4609	1	285	0,47	7,4
10	676	10,6	448	144	4617	1	286	0,47	6,7
11	676	10,6	449	145	4600	1	286	0,475	7
9	675	10,6	448	149	4677	1	285	0,465	7,3
8	675	10,7	448	148	4700	1	285	0,46	7,2
8	675	10,8	448	141	4711	1	285	0,462	6,9
6	675	10,8	447	143	4797	1	285	0,445	6,9
5	676	10,8	447	156	4812	1	286	0,435	7,3
4	676	10,8	446	144	4802	1	286	0,432	7,2
4	676	10,8	446	148	4839	1	286	0,432	7,3
3	676	10,9	446	149	4831	1,011	285	0,43	7,4
4	677	10,8	447	147	4819	1	286	0,435	6,8
3	675	10,9	446	150	4873	1	284	0,435	6,9
3	676	10,8	446	149	4876	1	285	0,435	7,1
4	677	10,7	446	148	4821	1,012	285	0,438	7,2
4	676	10,8	446	152	4847	1,012	285	0,438	6,8
3	675	10,8	446	149	4848	1	284	0,43	7,3
3	675	11	446	155	4869	1,013	284	0,43	7
4	676	10,8	451	151	4852	1	285	0,436	7,5
4	676	10,9	447	153	4856	1	285	0,436	7,2
5	676	10,8	447	151	4803	1,01	285	0,44	7,4
5	676	10,8	448	153	4843	1	287	0,44	7,5
6	676	10,7	446	150	4782	1	285	0,443	7,4
6	675	10,8	446	149	4803	1	286	0,443	7,4
4	677	10,9	447	150	4848	1	285	0,432	7,5
6	676	10,8	447	149	4807	1	285	0,44	7,2
5	678	10,8	446	150	4823	1	284	0,438	7,4
6	674	10,8	447	149	4781	1	285	0,443	7,6
6	676	10,8	446	143	4817	1	285	0,443	6,9
4	676	10,9	446	149	4862	1	286	0,44	7,4
5	676	10,9	446	150	4870	1	284	0,445	7,5
5	676	10,8	447	152	4774	1	284	0,445	7,2
6	675	10,8	447	145	4813	1,01	285	0,448	6,6
5	676	10,8	446	148	4858	1	285	0,44	7
4	676	10,8	446	158	4865	1	284	0,438	7,5
6	675	10,8	447	151	4827	1,013	284	0,45	6,9
4	676	10,9	446	152	4903	1,011	286	0,43	7,6
4	676	10,9	447	151	4900	1	284	0,43	7,2
4	676	11	446	152	4884	1	285	0,428	7,5
4	677	10,9	446	149	4873	1	285	0,428	7
5	676	10,9	446	156	4864	1	285	0,43	7,5
5	676	10,8	447	151	4890	1,013	286	0,43	7,4
4	675	10,8	446	152	4862	1,013	284	0,428	7,5
4	677	10,8	446	152	4886	1	285	0,428	7,4
4	676	10,7	450	153	4861	1	285	0,428	7,6
4	676	11	447	152	4923	1	286	0,428	7,4

5	676	10,9	446	155	4869	1	286	0,43	7,4
5	676	10,9	446	150	4860	1	285	0,43	7,4
4	678	10,8	446	152	4904	1	285	0,425	6,7
4	676	10,9	446	149	4909	1	286	0,43	7,1
5	676	10,9	444	150	4904	1,011	285	0,44	6,5
4	676	10,9	446	153	4910	1	285	0,43	7,8
4	677	10,9	446	153	4925	1,013	285	0,43	7,3
3	675	11	446	151	4939	1	286	0,425	7,2
3	676	11,1	446	152	4933	1	285	0,425	7,1
4	676	11	446	149	4902	1	285	0,43	6,6
4	676	10,9	446	151	4896	1	285	0,43	7,4
3	677	10,9	446	151	4913	1	286	0,425	7,1
3	676	10,8	446	153	4919	1	286	0,425	6,6
3	676	11	446	149	4941	1	285	0,425	6,9
3	675	10,9	445	149	4906	1	285	0,425	6,7
3	676	11	446	143	4915	1	285	0,425	6,8
2	675	11	446	144	4911	1	285	0,42	7,3
1	676	11	446	148	4912	1	286	0,418	7,3
2	676	10,9	446	152	4939	1,011	286	0,42	7,4
2	675	10,9	446	147	4925	1	286	0,42	7,3
2	676	10,9	446	143	4921	1	285	0,42	7,4
3	676	10,9	446	148	4923	1	286	0,425	7,3
3	677	11	449	149	4931	1,012	284	0,425	7,6
4	676	10,9	446	143	4893	1,012	285	0,43	7,6
4	677	10,8	446	146	4884	1	285	0,43	7,3
5	675	10,8	446	146	4864	1,013	285	0,435	7,4
6	676	10,8	446	141	4855	1	284	0,445	6,9
6	677	10,9	446	147	4862	1	284	0,445	6,5
7	676	10,8	447	145	4791	1,01	285	0,45	7,4
7	676	10,8	447	147	4786	1	285	0,45	7,7
5	675	10,9	446	151	4869	1	285	0,435	7,4
6	677	10,9	446	148	4852	1	287	0,443	6,9
4	676	10,9	446	145	4893	1	285	0,43	7,1
4	677	10,9	446	153	4887	1	286	0,43	7,1
3	676	10,9	446	154	4895	1	285	0,428	7,6
3	677	11	445	150	4914	1	285	0,428	6,9
3	675	10,9	446	152	4933	1	284	0,428	7,4
3	676	10,9	446	151	4914	1	285	0,428	7,1
1	675	11	445	153	4950	1	285	0,415	7,6
2	676	10,9	445	154	4920	1,011	286	0,42	7,4
3	676	10,8	446	147	4907	1,01	284	0,425	7
1	676	10,9	445	146	4939	1,013	284	0,413	7,3
2	676	10,9	450	145	4913	1	285	0,42	7,5
2	676	10,9	446	146	4913	1	285	0,42	7,5
3	677	11	450	144	4940	1	284	0,425	7,5
3	675	10,9	446	149	4920	1	284	0,425	7,5
2	677	10,9	445	148	4952	1	286	0,42	7,4
3	676	10,9	446	148	4892	1,01	284	0,423	7,5
4	676	10,9	448	148	4895	1	285	0,432	7,3
6	677	10,8	446	149	4839	1	285	0,44	7,3
6	675	10,8	446	151	4825	1,013	285	0,44	7,2
6	677	10,8	446	144	4831	1,011	286	0,44	6,5
5	675	10,8	446	148	4838	1	284	0,436	7,6
6	676	10,7	446	146	4818	1	285	0,44	6,9

6	677	10,7	446	147	4764	1	285	0,44	6,9
2	677	10,8	445	150	4875	1	286	0,42	7
6	676	10,6	448	150	4763	1,013	286	0,442	7,3
5	677	10,8	446	147	4827	1,013	285	0,435	6,9
5	674	10,8	447	150	4792	1	285	0,435	7,4
4	676	10,6	447	149	4827	1	286	0,43	7,4
4	677	10,7	448	148	4813	1	285	0,43	6,9
4	675	10,7	447	149	4843	1	285	0,43	7,2
4	675	10,7	448	148	4810	1	285	0,43	7
4	676	10,8	448	147	4820	1	286	0,43	7,5
4	676	10,7	448	152	4839	1	285	0,431	7,5
4	676	10,8	447	153	4823	1,011	285	0,43	7,4
4	676	10,7	447	154	4825	1	285	0,432	6,8
4	676	10,7	449	151	4821	1,013	286	0,432	7,5
5	676	10,7	447	151	4815	1	286	0,435	7,4
5	676	10,7	448	144	4777	1	285	0,435	7,1
6	676	10,7	448	137	4779	1	285	0,44	6,7
6	676	10,7	448	145	4771	1	285	0,44	7,2
6	676	10,6	448	145	4771	1	285	0,44	7,2
7	676	10,6	448	142	4740	1	286	0,445	6,7
7	676	10,6	448	145	4749	1	286	0,45	7,1
7	676	10,7	450	153	4750	1	286	0,45	7,6
7	676	10,6	448	146	4753	1	285	0,45	7,1
9	676	10,6	449	149	4702	1	286	0,465	7,4
14	675	10,4	453	144	4487	1	284	0,495	7,4
14	675	10,4	451	146	4479	1,011	285	0,495	7,4
14	676	10,4	451	146	4501	1	285	0,495	7
14	676	10,4	456	148	4503	1	285	0,495	7,4
9	677	10,7	455	149	4672	1	284	0,47	7,5
6	676	10,6	448	149	4783	1,012	284	0,45	7,5
3	677	10,8	447	152	4871	1,012	285	0,432	7,3
2	675	10,8	446	156	4879	1	285	0,42	7,4
2	677	10,9	446	148	4890	1,013	285	0,42	6,3
3	676	10,9	447	151	4864	1	287	0,425	6,7
3	676	10,8	450	156	4838	1	285	0,425	7,4
4	676	10,7	449	152	4846	1,01	286	0,435	7,6
5	677	10,8	448	154	4815	1	285	0,435	7,5
6	675	10,6	448	151	4754	1	285	0,44	6,8
6	676	10,7	452	145	4797	1	284	0,44	7,4
7	676	10,6	448	150	4719	1	285	0,445	7,1
7	676	10,7	448	154	4756	1	285	0,445	7,5
7	675	10,7	448	152	4731	1	286	0,445	7,3
9	675	10,7	448	152	4683	1	284	0,46	6,9
10	675	10,6	449	152	4665	1	284	0,465	7,2
13	676	10,6	450	154	4597	1	285	0,48	7,3
15	676	10,6	450	143	4552	1	285	0,5	6,9
15	675	10,6	451	136	4544	1	284	0,5	6,1
15	676	10,6	451	140	4530	1,01	284	0,5	7,3
14	675	10,6	450	144	4554	1	286	0,495	7,1
14	676	10,6	450	149	4587	1	284	0,495	7,7
12	677	10,6	450	142	4630	1,013	285	0,48	6,2
9	676	10,8	449	148	4785	1,011	285	0,462	7,1
7	676	11	448	148	4859	1	285	0,45	7,6
4	675	10,9	447	155	4936	1	286	0,43	6,5

1	676	11	447	152	5020	1	284	0,415	7,4
0	676	11	446	151	5024	1	285	0,41	7,1
1	676	11	446	148	4988	1,013	285	0,415	7,3
2	676	11	447	150	4979	1,013	286	0,42	7,4
3	676	10,9	448	155	4969	1	286	0,425	7,5
3	676	11	448	154	4952	1	285	0,425	7,4
4	676	11	448	152	4938	1	285	0,432	6,6
4	676	10,9	448	152	4920	1	286	0,435	7,4
5	676	10,9	448	147	4913	1	285	0,438	7,3
6	677	10,9	448	148	4869	1	285	0,44	7,4
5	676	11	452	146	4918	1	285	0,435	7,4
5	677	11	448	148	4891	1,011	286	0,435	7,3
7	675	10,8	449	150	4849	1	285	0,45	7,1
8	675	10,9	448	149	4849	1,013	285	0,456	7,2
9	675	10,9	449	149	4801	1	285	0,46	7,1
11	676	10,7	450	153	4716	1	286	0,47	7,5
11	676	10,8	450	152	4722	1	286	0,471	7,1
10	676	10,8	450	148	4706	1	285	0,465	7,4
9	676	10,9	449	151	4807	1	285	0,46	7,5
8	675	10,9	448	151	4818	1	285	0,456	7,3
7	676	10,9	448	148	4871	1	285	0,453	7,2
6	677	10,9	448	147	4909	1	286	0,44	6,8
5	676	10,8	448	150	4931	1	286	0,435	7
4	677	10,8	448	153	4952	1	286	0,43	7,1
2	675	11,1	447	141	5002	1	285	0,425	7,2
2	677	10,9	447	138	5011	1,011	286	0,425	7
2	677	11,1	446	147	5025	1	284	0,45	7
2	677	11,1	446	141	5010	1	285	0,425	6,8
2	675	11,2	446	148	5014	1	285	0,425	7,2
2	676	11	447	146	5004	1,012	285	0,425	6,9
2	676	11,1	446	150	5026	1,012	284	0,426	7,3
3	675	11	447	154	4991	1	284	0,43	7,4
2	676	11,1	447	151	5001	1,013	285	0,424	6,9
2	676	11,1	451	144	5028	1	285	0,425	7,5
2	676	11,2	448	141	5019	1	285	0,425	7,5
3	675	11,1	450	141	5007	1,01	287	0,43	7,5
3	677	11	447	148	4993	1	285	0,435	7,4
4	677	11	447	151	4996	1	286	0,435	7,4
4	676	11	448	152	4969	1	285	0,435	6,9
6	675	10,9	448	148	4907	1	285	0,44	7,3
6	676	11	448	147	4929	1	284	0,44	6,6
5	676	11	448	151	4910	1	285	0,436	7,1
5	676	11	448	147	4952	1	285	0,436	6,5
4	676	11	447	150	4960	1	286	0,432	7,5
6	677	11	448	151	4864	1	284	0,44	6,5
5	676	11	448	145	4953	1	284	0,435	6,7
4	676	10,9	446	156	4912	1,011	285	0,432	7
3	676	10,8	447	149	4887	1,01	285	0,43	7,3
3	676	10,9	447	149	4918	1,013	284	0,43	7,2
4	676	10,8	448	148	4849	1	284	0,435	7,4
4	676	10,7	448	145	4823	1	286	0,435	7,1
3	676	10,9	449	158	4900	1	284	0,43	7,4
4	676	10,7	447	150	4847	1	285	0,436	7,3
4	677	10,8	447	157	4885	1	285	0,436	7,6

3	676	10,7	449	147	4884	1	285	0,43	7,6
3	676	10,8	447	144	4857	1,012	286	0,43	6,7
3	676	10,7	447	151	4889	1	284	0,438	7,3
4	675	10,8	447	147	4839	1	285	0,438	7,4
5	676	10,7	448	148	4841	1,011	285	0,44	7,2
5	675	10,8	451	142	4841	1,01	286	0,44	7,5
6	676	10,8	448	152	4796	1	286	0,44	7,5
7	675	10,6	449	153	4788	1	285	0,44	7,7
9	675	10,6	449	151	4682	1	285	0,454	7,6
8	676	10,6	449	148	4728	1	286	0,45	7,3
9	677	10,6	449	147	4738	1	285	0,454	6,6
9	677	10,6	449	150	4722	1	285	0,456	7,3
10	676	10,5	449	148	4653	1	285	0,468	6,7
10	676	10,5	449	149	4661	1	286	0,468	7,2
9	676	10,6	449	150	4693	1,013	285	0,47	7
10	676	10,6	449	149	4648	1	285	0,47	6,7
11	675	10,5	450	141	4617	1	285	0,475	6,9
10	676	10,6	449	138	4689	1	286	0,47	6,8
9	677	10,6	449	139	4686	1	286	0,468	7,2
8	676	10,6	449	148	4731	1	285	0,45	7,4
8	676	10,6	448	140	4738	1	285	0,45	7
8	676	10,7	448	145	4738	1,01	285	0,45	7,4
8	676	10,7	448	150	4739	1,01	285	0,45	7,5
8	676	10,7	448	153	4749	11	286	0,45	7,4
8	676	10,6	448	153	4769	1	286	0,45	7,6
8	678	10,6	448	157	4765	1	286	0,45	6,7
8	676	10,6	448	147	4749	1	285	0,45	6,7
9	677	10,7	448	147	4740	1,012	286	0,456	7,4
9	676	10,7	448	150	4739	1	285	0,456	7,1
9	677	10,7	448	146	4726	1,012	285	0,456	6,7
11	676	10,6	449	148	4605	1	285	0,47	6,7
13	677	10,3	450	145	4465	1,013	284	0,48	7
13	595	10,1	442	148	3638	1	284	0,48	6,9
13	675	10,5	449	152	4525	1,01	285	0,48	7,3
13	677	10,5	449	148	4551	1	285	0,48	6,9
14	676	10,4	449	147	4508	1	285	0,485	7
16	676	10,4	450	145	4445	1,013	287	0,5	6,6
16	676	10,5	450	147	4466	1,011	285	0,5	6,8
21	675	10,3	451	144	4302	1	286	0,52	6,8
19	676	10,2	451	147	4324	1	285	0,51	7,3
20	676	10,2	451	145	4310	1	285	0,512	6,6
18	676	10,4	450	141	4403	1	284	0,49	7
15	675	10,4	454	141	4500	1,013	285	0,48	7,5
13	676	10,5	448	144	4558	1,013	285	0,475	7
13	677	10,5	448	150	4511	1	286	0,475	7,4
13	676	10,5	448	137	4546	1	284	0,475	7,4
12	676	10,6	448	140	4556	1	284	0,47	7,4
13	676	10,5	453	140	4542	1	285	0,475	7,4
13	676	10,5	451	142	4554	1	285	0,475	7,5
13	676	10,6	449	154	4544	1	284	0,475	7,4
12	676	10,6	448	160	4589	1	284	0,468	7,5
12	676	10,6	452	144	4594	1,011	286	0,469	7,5
13	676	10,4	448	156	4531	1	284	0,47	7,3
12	676	10,6	448	153	4572	1,013	285	0,47	7,4



14	676	10,5	449	135	4546	1	285	0,485	7,4
14	676	10,6	453	136	4556	1	285	0,485	7,5
14	677	10,5	448	144	4543	1	286	0,485	7,7
14	675	10,5	448	143	4535	1	284	0,485	7,2
16	676	10,5	449	147	4476	1	285	0,488	7,3
18	676	10,3	450	145	4417	1	285	0,492	6,9
18	676	10,5	449	148	4445	1	286	0,492	7
20	675	10,3	450	149	4359	1	286	0,51	6,3
19	677	10,2	450	153	4363	1	285	0,5	7,5
19	676	10,3	450	143	4340	1	285	0,5	7,1
14	676	10,5	448	145	4558	1	286	0,485	6,6
11	676	10,6	447	152	4610	1,011	285	0,468	7,6
9	675	10,5	446	145	4661	1	285	0,45	7,4
6	675	10,7	445	152	4757	1	285	0,44	7,4
4	677	10,7	447	141	4804	1	286	0,43	7,4
3	675	10,7	449	132	4836	1,012	285	0,425	7,5
4	676	10,8	445	143	4800	1,012	285	0,43	7,3
5	677	10,7	451	140	4754	1	285	0,435	7,4
5	676	10,7	445	150	4756	1,013	286	0,435	7,4
6	676	10,8	445	151	4738	1	286	0,44	7,4
7	676	10,7	445	144	4736	1	285	0,445	6,9
7	676	10,7	445	141	4736	1,01	285	0,445	7,3
8	648	10,6	421	148	4446	1	285	0,448	7,3
9	677	10,7	446	151	4694	1	285	0,45	7,5
10	677	10,7	446	150	4645	1	286	0,46	7,2
12	676	10,6	447	147	4612	1	286	0,465	7
15	676	10,5	448	153	4518	1	286	0,488	7,1
17	675	10,5	449	146	4481	1	285	0,492	7,3
19	675	10,6	450	145	4436	1	286	0,5	6,9
21	677	10,4	451	147	4369	1	284	0,52	7,2
18	677	10,4	451	151	4413	1	285	0,495	7,4
19	676	10,4	451	151	4404	1	285	0,5	7,4
16	676	10,4	451	147	4483	1	285	0,49	7,5
14	677	10,5	449	147	4540	1,01	284	0,48	7,2
11	675	10,6	448	150	4624	1	284	0,465	7,4
9	676	10,7	452	141	4741	1	285	0,45	7,4
6	676	10,9	449	142	4866	1,013	285	0,44	7,5
1	676	10,8	445	147	4910	1,011	285	0,42	7,4
1	676	10,9	444	141	4926	1	287	0,42	6,7
1	677	10,9	444	139	4922	1	285	0,42	6,9
1	676	10,9	444	145	4926	1	286	0,42	7,4
1	675	11	445	139	4908	1	285	0,42	7,3
1	676	11	444	149	4918	1,013	285	0,42	7,3
2	676	11	445	154	4923	1,013	284	0,425	7,5
3	676	10,8	445	151	4882	1	285	0,43	7,3
4	677	10,9	449	138	4892	1	285	0,435	7,5
5	677	10,9	451	143	4852	1	286	0,436	7,5
7	676	10,8	451	152	4784	1	284	0,445	7,5
7	677	10,8	446	150	4775	1	284	0,445	7,1
10	676	10,6	446	153	4697	1	285	0,46	7,1
10	676	10,7	448	152	4655	1	285	0,46	7,6
14	676	448	448	154	4599	1,011	284	0,48	7
14	677	10,5	449	149	4559	1	284	0,48	7
16	676	10,6	450	153	4528	1,013	286	0,486	6,7

15	676	10,7	450	150	5454	1	284	0,485	7,3
13	676	10,7	449	147	4621	1	285	0,475	7,3
13	675	10,7	448	142	4635	1	285	0,475	7,4
10	676	10,7	448	145	4699	1	285	0,46	7,4
9	676	10,8	447	144	4758	1	286	0,458	6,7
7	676	10,8	446	144	4823	1	284	0,45	6,6
3	676	10,9	445	148	4961	1	285	0,43	6,7
0	676	11	444	149	5010	1	285	0,41	7,3
1	675	11,1	444	149	4985	1	286	0,42	7,4
0	676	11,1	444	150	5005	1	286	0,41	6,5
0	676	11	444	148	5015	1	285	0,41	6,9
1	676	11	444	148	4972	1,011	285	0,42	7,1
2	676	11,1	445	152	4957	1	286	0,43	7
3	676	11,1	445	153	4950	1	285	0,435	6,9
4	675	11	445	148	4919	1	285	0,436	5,9
5	676	11	446	147	4908	1,012	285	0,45	7,3
7	676	10,9	446	146	4857	1,012	286	0,455	7,1
8	676	10,9	451	147	4820	1	285	0,455	7,5
8	675	10,8	446	146	4787	1,013	285	0,455	7,2
8	676	10,9	446	146	4837	1	285	0,455	7,1
7	676	10,8	446	150	4847	1	286	0,452	7,1
8	676	10,9	445	145	4787	1,01	286	0,455	6,8
8	677	10,8	446	150	4798	1	285	0,455	7,2
7	675	10,9	445	150	4809	1	285	0,45	6,8
9	675	10,9	445	144	4802	1	285	0,46	7
13	675	10,8	447	152	4675	1	285	0,475	7,3
14	676	10,6	448	149	4615	1	286	0,48	7,1
15	675	10,6	449	148	4531	1	286	0,485	7,3
11	677	10,7	451	155	4674	1	286	0,47	7,5
8	676	10,8	450	147	4754	1	285	0,46	7,6
6	676	10,8	445	145	4842	1	286	0,44	7,4
3	677	10,8	444	151	4880	1	284	0,43	7,4
3	675	11	444	148	4897	1,011	285	0,43	7
3	676	11	445	155	4877	1,01	285	0,43	7,2
4	675	10,9	448	144	4878	1,013	285	0,435	7,4
3	677	10,9	445	148	4879	1	284	0,43	7,1
5	676	10,8	445	158	4828	1	284	0,438	7,3
5	676	10,8	445	147	4839	1	285	0,438	6,7
6	676	10,8	445	148	4813	1	285	0,452	7,1
7	676	10,8	448	143	4802	1	285	0,455	7,5
8	676	10,9	450	147	4797	1,01	287	0,458	7,6
10	676	10,8	451	150	4726	1	285	0,465	7,5
14	676	10,7	448	151	4602	1	286	0,475	7,5
12	676	10,7	447	147	4641	1,013	285	0,47	7,2
17	676	10,6	449	150	4510	1,011	285	0,49	7,4
19	675	10,5	450	154	4461	1	284	0,495	7,3
21	675	10,4	451	152	4414	1	285	0,52	7,3
20	676	10,5	450	146	4420	1	285	0,5	6,8
22	676	10,4	457	151	4390	1	286	0,52	7,4
21	676	10,5	451	146	4412	1,013	284	0,52	7,3
20	676	10,5	450	144	4438	1,013	284	0,52	7,1
16	677	10,6	449	147	4566	1	285	0,485	7,2
14	677	10,7	447	148	4659	1	285	0,475	7,5
9	677	10,7	448	151	4756	1	284	0,465	7,3

6	676	10,9	4454	153	4871	1	284	0,44	7,2
1	676	10,9	444	155	4945	1	286	0,41	7,4
1	677	10,9	444	148	4952	1	284	0,41	7
1	677	11	443	148	4926	1	285	0,41	7,3
2	676	11	444	153	4938	1,011	285	0,42	7,4
2	675	11	444	152	4903	1	285	0,42	7,3
2	676	10,9	444	151	4913	1,013	286	0,42	7,2
3	676	11	444	151	4902	1	284	0,43	7
3	676	10,9	445	152	4874	1	285	0,43	7
5	676	10,8	445	146	4848	1	285	0,435	7,3
5	676	10,9	446	151	4838	1	286	0,435	7,3
7	677	10,8	451	152	4802	1	286	0,445	7,3
7	676	10,8	446	151	4768	1	285	0,445	7
9	676	10,8	447	148	4716	1	285	0,465	7,1
11	676	10,8	448	150	4651	1	286	0,47	7
14	676	10,6	448	153	4610	1	285	0,48	7,2
17	676	10,6	449	151	4535	1	285	0,49	7,4
18	676	10,4	451	149	4464	1	285	0,495	7,3
18	676	10,5	454	139	4456	1,011	286	0,495	7,6
17	675	10,6	454	151	4502	1	285	0,49	7,5
16	676	10,6	453	153	4546	1	285	0,485	7,7
13	676	10,8	450	153	4639	1	285	0,479	7,6
10	676	10,8	448	157	4723	1,012	286	0,468	7,5
6	675	10,8	445	151	4841	1,012	286	0,44	7,2
3	677	11	444	152	4961	1	285	0,43	7
-1	676	11,1	443	149	5008	1,013	285	0,4	6,9
-1	677	11,1	444	150	4998	1	285	0,4	6,7
-1	676	11,1	443	152	5036	1	285	0,4	7
0	677	11,1	444	152	4982	1,01	286	0,41	7,3
0	676	11,1	444	152	4982	1	286	0,41	6,9
1	677	11,1	444	150	4990	1	286	0,412	7,1
2	676	11,1	444	158	4966	1	285	0,412	7,2
2	676	11	444	154	4956	1	286	0,43	7,5
3	675	11	444	156	4935	1	284	0,435	6,8
4	676	11	445	149	4908	1	285	0,436	6,6
5	676	10,9	445	149	4892	1	285	0,435	6,8
8	676	10,9	446	148	4800	1	285	0,45	6,8
9	676	10,8	446	142	4773	1	284	0,464	7,2
9	676	10,8	446	144	4743	1	284	0,465	6,9
13	676	10,8	447	148	4672	1	285	0,475	7,5
13	677	10,7	448	150	4628	1,01	285	0,475	7,3
15	675	10,6	449	147	4577	1	285	0,48	7,3
13	676	10,8	448	149	4656	1	287	0,475	7,3
12	676	10,7	448	150	4680	1,013	285	0,47	7,7
10	676	11	447	145	4777	1,011	286	0,468	7,6
7	677	11	446	146	4879	1	285	0,445	7,3
4	675	10,9	445	152	4934	1	285	0,435	7,3
2	675	11,1	445	148	4996	1	284	0,42	7,6
1	676	11,1	444	150	5012	1	285	0,41	7,3
1	676	11,1	444	150	5032	1,013	285	0,41	7,2
1	677	11,1	444	149	4992	1,013	286	0,41	6,1
1	677	11,2	444	144	5028	1	284	0,41	7,3
1	677	11,1	444	153	5004	1	284	0,41	6,8
1	677	11,1	444	150	4980	1	285	0,41	6,8

2	675	11	445	147	4961	1	285	0,42	6,9
3	675	11,1	444	146	4959	1	284	0,43	6,8
4	675	11	445	147	4920	1	284	0,435	7
4	676	11,1	445	149	4948	1	286	0,436	6,8
5	676	11	446	145	4898	1,011	284	0,436	7
5	676	11	445	148	4908	1	285	0,436	7
5	675	11	446	150	4885	1,013	285	0,436	7,1
5	677	10,9	446	148	4885	1	285	0,44	7
6	676	11	446	151	4887	1	286	0,44	6,8
6	675	11	445	150	4879	1	284	0,44	7,2
6	677	10,9	446	146	4876	1	285	0,44	6,8
7	676	10,9	446	150	4833	1	285	0,445	7,3
7	676	10,9	446	149	4831	1	286	0,46	6,8
8	675	10,8	446	147	4812	1	286	0,458	6,8
9	677	10,8	447	145	4777	1	285	0,464	7
12	676	10,6	446	139	4580	1	285	0,475	7,3
10	676	10,7	445	144	4644	1	286	0,47	7,2
7	676	10,8	446	149	4771	1	285	0,46	6,8
5	676	10,9	445	148	4893	1,011	285	0,435	6,7
2	676	10,9	444	147	4892	1	285	0,42	6,2
1	676	10,9	444	142	4910	1	286	0,41	6,9
1	677	10,9	444	146	4906	1	285	0,41	7
2	676	10,7	445	147	4903	1,012	285	0,42	7,3
2	676	10,9	445	150	4871	1,012	285	0,42	7,6
3	676	10,9	449	154	4905	1	286	0,43	7,2
3	677	10,9	445	149	4889	1,013	286	0,43	6,9
4	676	10,8	445	147	4846	1	285	0,435	6,9
4	676	10,9	445	149	4854	1	285	0,435	7
7	677	10,8	446	153	4803	1,01	285	0,46	6,9
6	677	10,9	446	149	4828	1	285	0,44	6,7
8	676	10,7	447	144	4735	1	286	0,445	6,6
10	676	10,8	445	145	4860	1	286	0,47	6,7
13	675	10,6	449	147	4596	1	286	0,476	6,6
16	676	10,5	450	141	4547	1	285	0,485	7,1
18	676	10,5	451	146	4485	1	286	0,49	6,6
19	676	10,5	451	154	4481	1	284	0,495	7,5
17	676	10,4	445	147	4593	1	285	0,48	6,6
16	676	10,5	452	143	4549	1	285	0,48	7,1
13	675	10,6	449	144	4628	1	285	0,475	7
9	676	10,7	449	153	4725	1,011	284	0,45	7,3
5	678	10,9	450	150	4938	1,01	284	0,445	7,4
4	676	10,9	448	143	4948	1,013	285	0,43	7,4
0	677	11	444	144	5007	1	285	0,41	6,1
-1	675	11	444	149	4993	1	285	0,4	6,8
0	677	11	445	149	5002	1	287	0,4	7,1
0	677	11,1	445	149	5002	1	285	0,4	7,1
0	676	11	445	157	4979	1	286	0,4	7
1	676	11	445	148	4990	1	285	0,41	7
2	676	11,1	445	144	4960	1,012	285	0,42	6,9

## EK B

### TEMEL DENETİM TEKNİKLERİ VE DENETİM ELEMANLARI

Bir kapalı-döngü denetim sistemi içinde denetim elemanının görevi, ölçme elemanı üzerinden geri beslenen çıkış büyüklüğünü, başvuru giriş büyüklüğü ile karşılaştırmaktır. Karşılaştırmadan ortaya çıkabilecek hata değerinin yapısına ve kendi denetim etkisine bağlı olarak uygun bir kumanda veya denetim sinyali üretmektedir (Yüksel 1995).

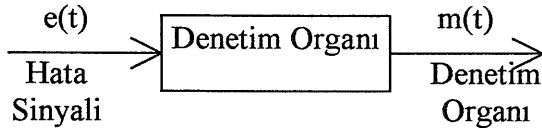
Dört temel denetim etkisi vardır.

- İkili veya aç-kapa (on-off) denetim etkisi
- Orantı denetim etkisi (P etkisi)
- İntegral denetim etkisi (I etkisi)
- Türev denetim etkisi (D etkisi)

Temel denetim etkileri bir arada uygun şekilde kullanılarak değişik denetim elemanları oluşturulur. Denetim elemanları davranışlarına göre; kesikli çalışan ve sürekli çalışan olmak üzere ikiye ayrılır. Aç-kapa denetim elemanı kesikli çalışan ve orantı, integral, türev etkileri ile çalışan denetim elemanları ise sürekli çalışan tiplerdir.

#### B.1.İki Konumlu veya Aç-Kapa Tipi Denetim Organı

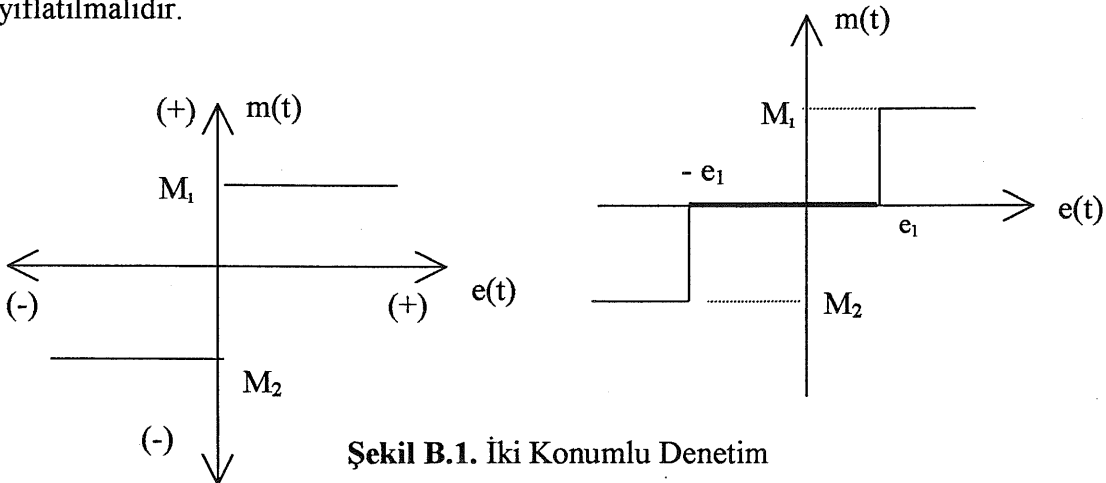
Sadece iki belirli konumda bulunur. Hata değerine bağlı olarak denetim elemanı ve buna bağlı olarak motor eleman ya devrede veya devrede değildir.



$$\begin{aligned} e(t) &= r(t) - b(t) \quad (b.1) \\ r(t) &= \text{Başvuru girişi} \\ b(t) &= \text{Geribesleme sinyali} \end{aligned}$$

$e(t) > 0$  için (çıkış istenilen değerden düşük)  $m(t) = M_1$  yani denetim sinyali kuvvetlendirilmelidir.

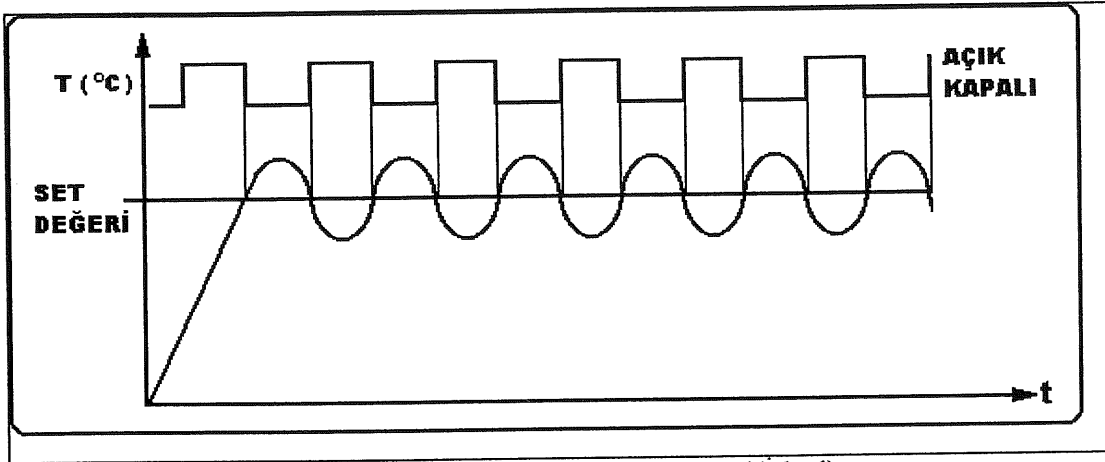
$e(t) < 0$  için (çıkış istenilen değer üstünde)  $m(t) = -M_2$  yani denetim sinyali zayıflatılmalıdır.



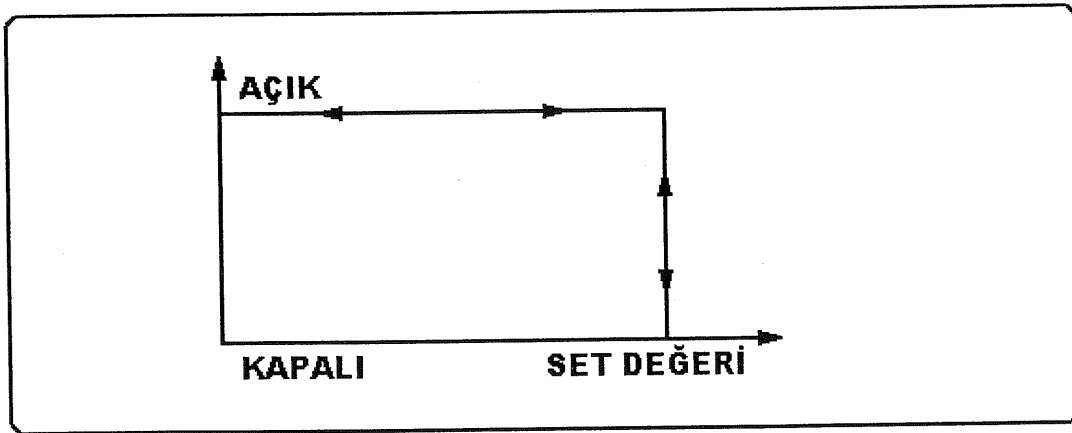
Şekil B.1. İki Konumlu Denetim

Fakat bir motorda sürtünme kuvveti nedeniyle ani bir ters hareket meydana getirilmeyeceğinden bir ölü bölge vardır. (b)

Bu durumda hata sinyali ölü bölge içinde kaldığı sürece denetim organı sıfır kumanda sağlar. Bu eşit hata değeri aşıldığında pozitif yada negatif yönde kumanda sağlanır. Bu nedenle istek değeri (ayar değeri) etrafında sürekli salınım oluşur.



Şekil B.2. Açık-Kapalı Kontrol (İdeal)



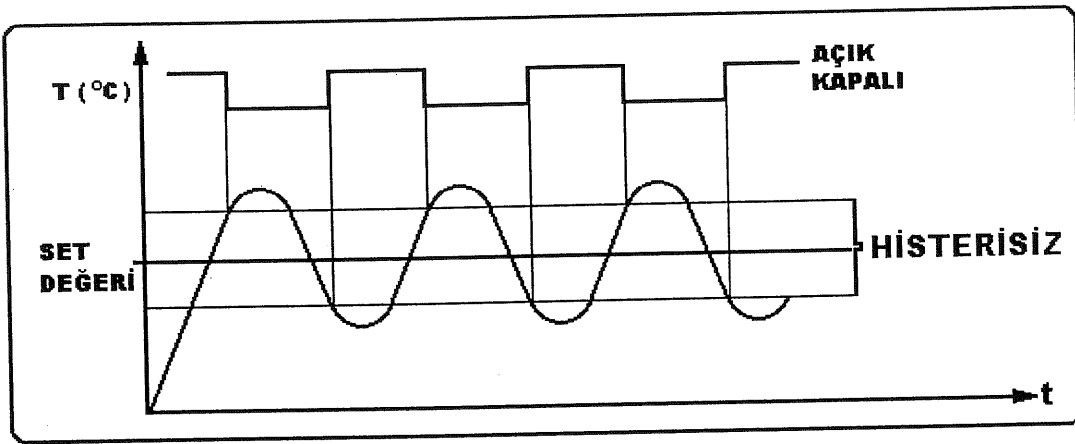
Şekil B.3. İdeal Açık-Kapalı Kontrol Transfer Eğrisi

Bu sistemde iki konumlu denetimde valf ya kapalı ya da açık kalır. Çıkış sinyali, iki sınır değer arasında sürekli değişir. Alt ve üst sınır değerler birbirine yaklaştırılarak salınım genliği azaltılabilir. Fakat bu durumlarda anahtarlama miktarı artar ve elemanın ömrü kısalmır.

Uygulama alanları ütü, buzdolabı, fırın gibi çok hassas denetim gerektirmeyen sistemlerde kullanılabilir.

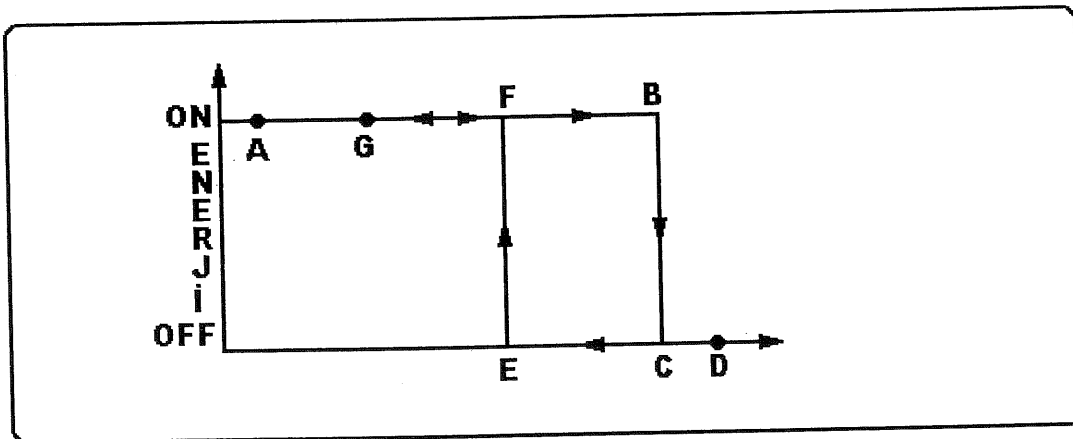
Bu tip kontrolün transfer eğrisi Şekil B.3.'te görülmektedir. Ancak pratikte, endüstriyel sistemlerde bu tip ideal bir Açık-Kapalı kontrol sistemi kullanılmaz. Proses'teki bozucu faktörler ve elektriksel gürültü nedeniyle, set(ayar) değeri geçişleri bu şekilde tek noktada olursa sistem osilasyona geçer ve devamlı ayar değeri etrafında sık aralıklı açma-kapama yapar. Özellikle bu durum son kontrol elemanlarının çok kısa sürede tahrip olmasına neden olur.

Bu durumu önlemek için set değeri geçişlerinde "histerezis" ya da "sabit bant" oluşur. Şekil B.4.'te sabit bantlı açık-kapalı kontrol eğrisi görülmektedir.



Şekil B.4.Histerisizli açık-kapalı kontrol eğrisi

Şekil B.5.'te ise Histerisizli açık- kapalı kontrol tipi transfer eğrisi görülmektedir



Şekil B.5.Histerisizli Açık-Kapalı Kontrol Transfer Eğrisi

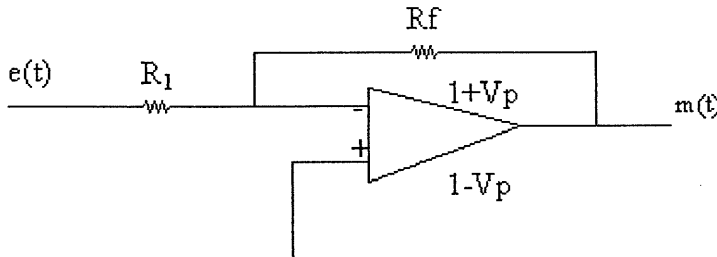
## B.2.Orantı Tipi Denetim Organı (P - Denetim)

Denetim organı çıkışı ile girişi bir oransal sabite eşitlenir.

$$\frac{m(t)}{e(t)} = KP \quad m(t) = Kp.e(t)$$
$$L[m(t)] = L[Kp.e(t)] \Rightarrow M(s) = Kp.E(s) \Rightarrow Kp = \frac{M(s)}{E(s)} \quad (b.2.)$$

Burada  $Kp$ , orantı kazancıdır ve sabittir.

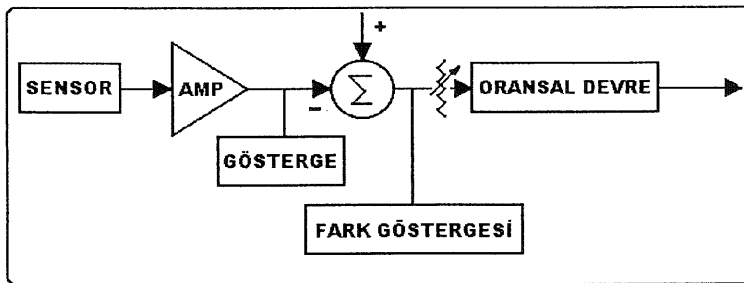
Hata ne kadar büyük olursa düzeltici denetim sinyali,  $m(t)$  de o oranda büyük olur. Hata çok küçük olduğunda ise denetim organı yeteri kadar etkili düzeltici sinyal üretmez. Bu nedenle bu tip denetim sistemleri kalıcı durum ( $r(t) = b(t)$  durumu,  $r(t) =$  Başvuru girişi,  $b(t) =$  geri besleme sinyali) hatası verirler.Kazanç ( $Kp$ ) artırılarak bu durum düzeltilebilir. Fakat bu sefer de elemanın doyma değeri aşırsa sabit çıkış değeri verir. Bu nedenle sağlıklı bir kontrol gerçekleşmez.



Şekil B.6. P-Tipi Denetim Organı

Bu tip denetim organında cevap süresi yani çıkışın istenilen değere ulaşma süresi uzundur. Bu sürenin kısaltılması için integral tipi denetim organı ile uygun hale getirilir.

Oransal kontrolü, blok şema ile gösterecek olursak;



Şekil B.7. Oransal Kontrol Blok Şeması

Şekil B.7.'de görüldüğü gibi sensör yardımıyla algılanan sıcaklık sinyali ortam sıcaklık kompanzasyonu yapıldıktan sonra yükseltici bir devreden geçerek set değeri ile karşılaştırılır. İki arasında fark alınarak hata değeri veya fark değeri bulunur. Eğer bu değer pozitifse proses, set değerinin altındadır. Negatif ise proses, set değerinin üstündedir. Fark sıfır ise proses set değerindedir.



Fark değeri oransal kontrol devresinden geçerek uygun çıkış formuna gelir. Proses tam set değerinde tutmak zordur. Denge durumuna gelinceye kadar sıcaklık değişimi olması, hatta sıcaklık değeriyle set değeri arasında belli bir fark kalması oransal kontrolün en belirgin özelliğidir.

Set değeri ile sistemin oturduğu ve sabit kaldığı sıcaklık arasındaki farka "OFFSET" denir. Offset'i azaltmak için oransal bant küçültülebilir. Ancak daha önce belirtildiği gibi oransal bant küçüldükçe, açık-kapalı kontrolle yaklaşıldığı için set değeri etrafında salınımlar artabilir. Geniş oransal bantta offset'in büyük olabileceği düşünülerek prosese uygun oransal bantın seçilmesi gerekir.

Sıcaklık yükselir, birkaç kere set değeri etrafında salınım yaptıktan sonra set değerinin üzerinde veya altında sabit bir sıcaklık farkı ile gelip oturur. Offset'i artı veya eksi olabilir. Bir proste tüm ayarlar yapıldıktan sonra, örneğin, artı oluşan offset değeri proste birkaç küçük değişiklik olması ile eksi değere gidebilir veya artı olarak yükselebilir.

### B.3. İntegral Etki ve Orantı Artı İntegral Tipi Denetim Organı (PI-Denetim)

Orantı etkide ortaya çıkan kalıcı durum hatasını gidermek için hatanın integrali ile orantılı deneti etkisi ilave edilir.

$$m(t) = Ki \int_0^t e(t) dt \quad \text{veya} \quad m(t) = \frac{1}{Ti} \int_0^t e(t) dt \quad (b.3)$$

Burada

Ki = İntegral etki kazancı,

Ti = İntegral zaman sabiti

değerlerini ifade ederler.

Bu etkinin transfer fonksiyonu

$$M(s) = K \left( \frac{E(s)}{s} \right) \Rightarrow \frac{M(s)}{E(s)} = \frac{Ki}{s} \quad \text{veya} \quad (b.4)$$

$$M(s) = \frac{1}{Ti} \left( \frac{E(s)}{s} \right) \Rightarrow \frac{M(s)}{E(s)} = \frac{1}{TiS} \quad (b.5.)$$

şeklindedir.

İntegral etkinin ortaya çıkışı oluşan hata birikimi ile orantılıdır.

Uygulamalarda integral etki daha çok oransal etki ile kullanılarak cevap süresi kısaltılır.

$$m(t) = Kpe(t) + Ki \int_0^t e(t) dt \quad \text{veya} \quad (b.6)$$

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (b.7.)$$

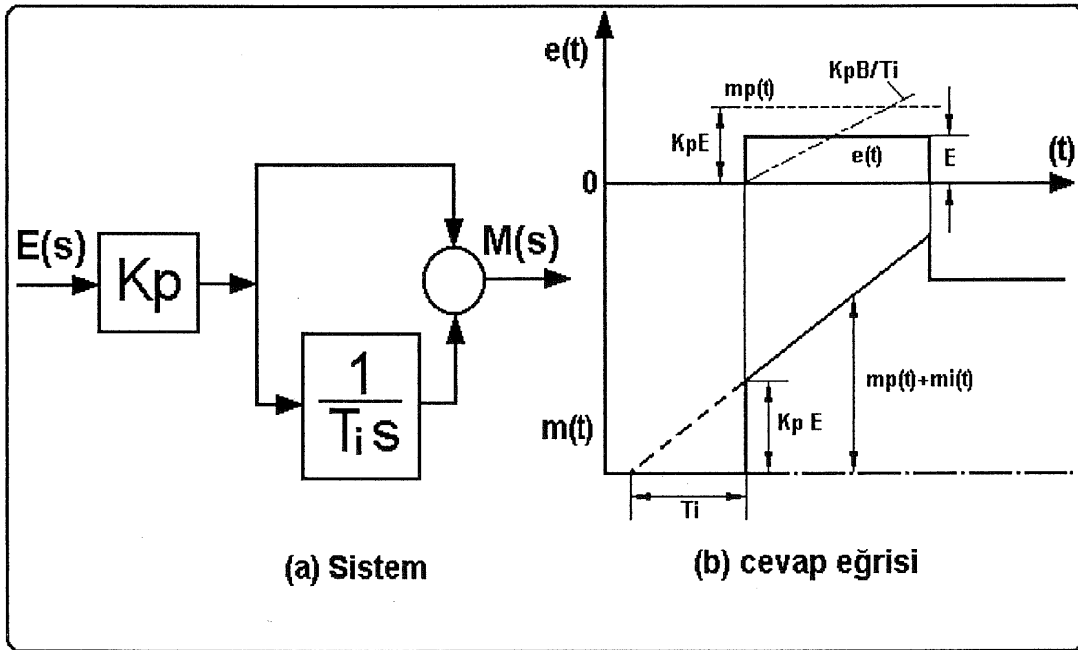
Burada  $K_p/K_i = T_i$  integral etki zamanıdır. PI-denetiminin transfer fonksiyonu

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (b.8.)$$

şeklindedir.

Böylece hata sıfır olana kadar değişimi sürdüren denetim etkisi sağlanır.

İntegral etkinin etkisini, Şekil B.8. 'de verilen PI kontrolün geçici bir hata karşısında gösterdiği açık çevrim cevabında görülebilir.



Şekil B.8. PI Denetim Etkisi

Başlangıçta hata(sapma) sıfır olup, kontrolör çıkışı belli bir değerde (veya sıfır değerinde) bulunmaktadır. Daha sonra şiddeti olan ve belli bir süre sabit kalan ve sonunda sıfır olan bir basamak hata değişimi uygulanmıştır. Kontrol etkisinde görülen başlangıç sıçraması tamamen orantı etkiden,  $m_p(t)$  'den dolayı ortaya çıkmış olup;  $m_p(t) = K_p E$  hatanın şiddeti,  $E$  sabit kaldığı sürece sabit kalır.

Bir sabitin integrali zamanın doğrusal bir fonksiyonu olup PI kontrolü içinde integral etkinin payı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$m_i = (K_p E / T_i) t \quad (b.9.)$$

Bu da Şekil B.8.'de görüldüğü gibi eğimi  $K_p E / T_i$  olan bir rampa fonksiyonudur. İntegral etki zamanı  $T_i$ , ne kadar küçük olursa rampanın eğimi o kadar dik olur ve verilen bir zaman için integral etki payı o oranda büyük olur. Hatta sıfır olana kadar rampa yükselmeye devam eder ve hatanın sıfır olduğu anda integral etki değişimi durur ve orantı etki payı  $K_p E$  miktarı kadar aşağı sıçrar.

En yaygın kullanım alanları basınç, seviye ve akış denetim sistemleridir. İntegral etki denetlenen çıkış büyüklüğünde meydana gelebilecek kalıcı durum hatalarını ortadan kaldırır. Değişen talepler üzerinde yeterli denetim etkisi sağlanır.

Kazanç çok yüksek tutulursa (sınır değeri aşılsa) çıkış doyma değerinde (+Vp1, -Vp) sabit kalır. Bu durumda etkili deneti sağlanamaz.

#### B.4. Türev Etki ve Orantı Artı Türev Tipi Denetim Organı(PD-Denetim)

$$m(t) = Kd \frac{de(t)}{dt} \quad \text{veya} \quad m(t) = Td \frac{de(t)}{dt} \quad (b.10)$$

şeklinde ifade edilir.

Transfer fonksiyonu;

$$\frac{M(s)}{E(s)} = Kd.S \quad \text{veya} \quad \frac{M(s)}{E(s)} = Td.S \quad (b.11.)$$

şeklinde dir.

Türev etkinin en önemli üstünlüğü hata değişmeye başlar başlamaz hatanın giderilmesini sağlar. Fakat sabitin türevi sıfır olduğu için türev denetimi, zamanla değişmeyen sabit hata üzerinde etkili değildir. Bu nedenle orantılı denetim organı ile birlikte kullanılır.

$$m(t) = Kp e(t) + Kd \frac{de(t)}{dt} = Td.S \quad (b.12.)$$

şeklinde olur.

$$m(t) = Kp \left( e(t) + \frac{Kd}{Kp} \frac{de(t)}{dt} \right)$$

olur.

$$Td = \frac{Kd}{Kp} \quad (b.13.)$$

(türev etki zamanı)

PD denetiminin transfer fonksiyonu;

$$\frac{M(s)}{E(s)} = Kp(1 + Tds) \quad (b.14.)$$

şeklindedir.

Orantı etkiye türev etkisi ile elde edilen PD-denetim, kalıcı durum hatasını sıfırlar. Sakıncası ise denetim sinyalleri yanında sistemde ortaya çıkan gürültü sinyallerini de kuvvetlendirir. Son denetim organı çıkışında salınımlı hareket oluşur.

Uygulama alanları servo mekanizmalardır

### B.5. Orantı Artı İntegral Artı Türev Etki ve Denetim Organı(PID-Denetim)

PID denetim; üç temel denetim etkisinin üstünlükleri tek bir birim içinde birleştirir. İntegral etki , sistemde ortaya çıkabilecek kalıcı-durum hatasını sıfırlar. Türev etki , yalnızca PI denetim etkisi kullanılması haline göre sistemin aynı bağıl kararlılığı için cevap hızını artırır. Böylece PID-denetim organı sistemde sıfır kalıcı-durum hatası olan hızlı bir cevap sağlar.

$$m(t) = Kpe(t) + \frac{Ki}{Kp} \int_0^t e(t)dt + \frac{Kd}{Kp} \frac{de(t)}{dt} \quad (b.15.)$$

$$m(t) = Kp \left[ e(t) + \frac{1}{Ti} \int_0^t e(t)dt + Td \frac{de(t)}{dt} \right]$$

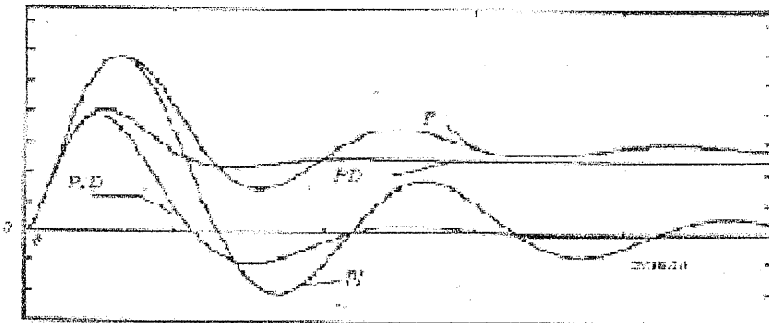
şeklindedir.

Transfer fonksiyonu;

$$\frac{M(s)}{E(s)} = Kp \left[ 1 + \frac{1}{TiS} + TdS \right] \quad (b.16.)$$

şeklindedir.

Uygulama alanları sıcaklık ,pH ,yoğunluk , karışım v.b alanlardır.



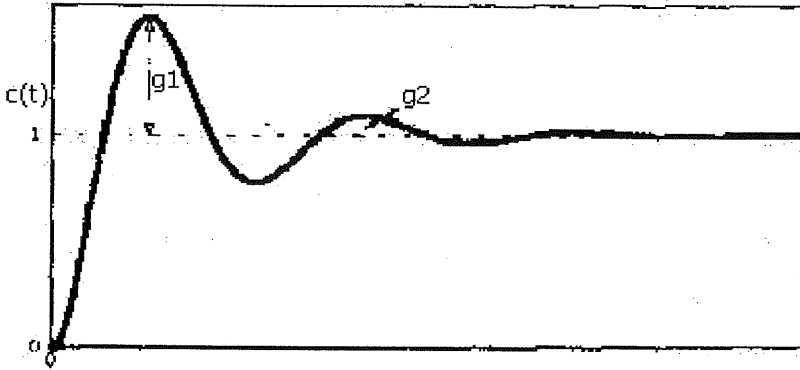
Şekil B.9. Çeşitli denetim etkilerinin karşılaştırılması

## B.6. Denetim Organlarının Deneysel Ayarı

Kapalı çevrim denetim sisteminin referans girişine bir basamak fonksiyonu uygulanması halinde sistem cevabının yeni kalıcı durum değerine en kısa zamanda ve kararlı bir şekilde erişmesini sağlayan denetim organı ayarı en uygun ayar kabul edilir. Bu amaçla, Ziegler ve Nichols tarafından bir ölçüt geliştirilmiş(1942) olup bu ölçüte göre,  $c(t)$  zaman alanı cevap eğrisinin,  $g_2$  ikinci aşama genliğinin,  $g_1$  birinci aşama genliğine oranı  $\frac{1}{4}$  olması gerekir. Şekil B.10'da gösterildiği gibi cevap eğrisinde, ikinci aşama genliğinin  $g_2$ 'nin, birinci aşama genliği  $g_1$ 'e oranının  $\frac{1}{4}$ 'üne düşmesi yük değişimleri için düzenleyici türünden denetleyiciler için en uygun ayar kabul edilir. bu ölçütün matematiksel bir dayanağı olmamakla birlikte, hızlı cevap ve çabuk sönümlenme sağladığı deneysel olarak saptanmıştır. Bu ölçüte göre bulunacak denetim organı ayarının tek olmayacağı belirgindir. Deneysel yolla yapılan ayar yöntemlerinden biri titreşim yöntemidir.

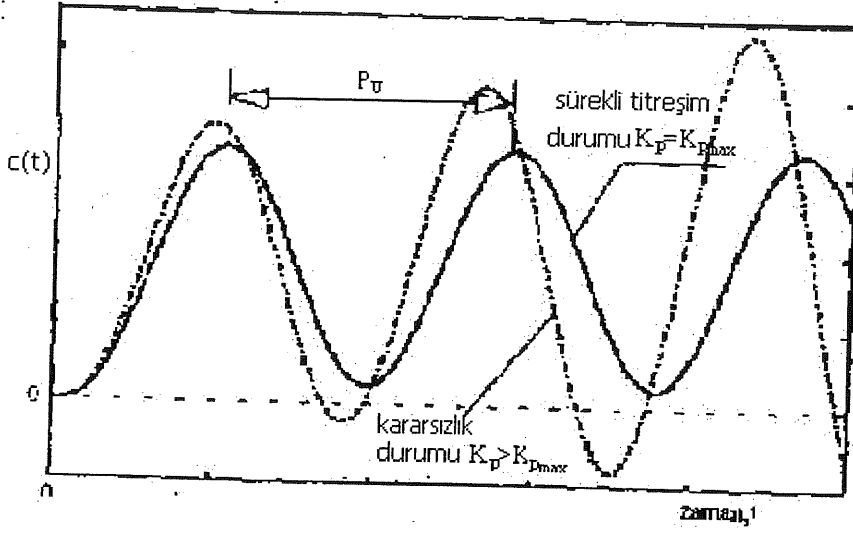
### B.6.1. Titreşim Yöntemi

Ziegler ve Nichols tarafından geliştirilen sürekli titreşim yöntemi deneysel yöntemlerin en tanınmış olanlarından biridir. Bu yöntemin öngördüğü ayarlar hemen hemen denetim denetim sistemi altında standartlar olarak kabul edilmektedir.



Şekil B.10. Titreşimli Cevap Eğrisi

Bu yöntemin esası, başlangıçta integral ve türev etkilerini devre dışı bırakıp denetim organının sadece orantı etki ile deneye tabi tutulmasına dayanır. Deney başlangıcında integral zaman sabiti sonsuza, türev zaman sabiti de sıfıra ayarlanarak bu denetim etkileri sıfırlanır ve denetim organı üzerinde sadece orantı etki kalır. Bu durumda kapalı çevrim sistemin referans girişine bir basamak değişimi uygulanır ve orantı etki kazancı  $K_p$  değiştirilerek bu işlem birkaç kez tekrarlanır. Sistem cevabı  $c(t)$  sürekli sünüsoidal titreşim yapan bir eğri haline erişinceye kadar orantı kazancı  $K_p$  artırılır. Bu duruma karşılık gelen orantı kazancına  $K_{pmax}$  ve titreşim periyoduna  $P_u$  (dakika) denir(Şekil B.10). Bu kazanç değeri  $K_{pmax}$  sistemin kararsızlık sınırına erişmeden önce ulaşabileceği en yüksek değerdir. Daha sonra parametre değerleri ( $K_p$ ,  $T_d$ ,  $T_i$ )'de verilen formüllere göre hesaplanır ve denetim organı bu değerlere göre ayarlanır. Ziegler ve Nichols pek çok deneyler yaparak tabloda verilen sonuçların ilişkilerini sağlamışlardır.



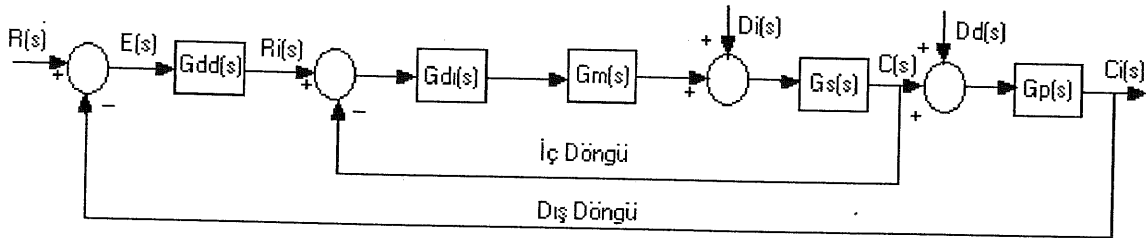
Şekil B.11. Titreşim Yöntemi

Tablo B.1. Titreşim Yöntemine Göre Denetim Organı Ayar Değerleri

Etki Türü	$K_P$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_{pmax}$	—	—
PI	$0.45K_{pmax}$	$0.825P_u$	—
PID	$0.6K_{pmax}$	$0.5P_u$	$0.125P_u$

### B.7. Kademeli Denetim

Kademeli denetim genellikle tek-döngülü denetim yolu ile bozucu girişlerin etkisinin giderilemedi durumlarda kullanılır. Kademeli denetimde iç döngünün zaman sabiti dış döngü veya tüm sistem zaman sabitinden daha küçük olmalıdır. Kademeli denetim temelde, sistem bant genişliğini artıran ve iç döngüye giren bozucunun etkisini azaltan yönde etki gösterir.



Şekil B.12. Kademeli Denetim

## ÖZGEÇMİŞ

Mehlika ŞENGÜL, 1976'da Erzurum'da doğdu. İlk öğrenimini Erzurum'un ilçelerinden olan İspir'de 25 Şubat İlkokulu'nda tamamladı. Orta öğrenimini İspir Lisesi'nde tamamladı. Lise öğrenimini İzmit Lisesi'nde tamamladı. 1993 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 1998 yılında bölüm birincisi olarak mezun oldu. 1998 yılı Ekim ayından itibaren Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.