

**ERZURUM KAMPÜS HASTANESİNE
UYGULANACAK TRİJENERASYON SİSTEMİNİN
FİZİBİLİTESİ**

Dündar Arif EKİNCİ

**Doktora Tezi
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Doç. Dr. Ömer ÖZYURT
Prof. Dr. M. Akif CEVİZ**

2013

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**ERZURUM KAMPÜS HASTANESİNE UYGULANACAK
TRİJENERASYON SİSTEMİNİN FİZİBİLİTESİ**

Dündar Arif EKİNCİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ERZURUM
2013**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**ERZURUM KAMPÜS HASTANESİNE UYGULANACAK TRİJENERASYON
SİSTEMİNİN FİZİBİLİTESİ**

Doç. Dr. Ömer ÖZYURT danışmanlığında ve Prof. Dr. M. Akif CEVİZ yardımcı danışmanlığında Dündar Arif EKİNCİ tarafından hazırlanan bu çalışma 06.12.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI

İmza:

Üye : Prof. Dr. M. Akif CEVİZ

İmza:

Üye : Doç. Dr. Ömer ÖZYURT

İmza:

Üye : Doç. Dr. Abdurrahim BÖLÜKBAŞI

İmza:

Üye : Doç. Dr. Nedim SÖZBİR

İmza:

Üye : Doç. Dr. Kemal ÇOMAKLI

İmza:

Üye : Yrd. Doç. Dr. M. Emin ARZUTUĞ

İmza:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirilerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

ERZURUM KAMPÜS HASTANESİNE UYGULANACAK TRİJENERASYON SİSTEMİNİN FİZİBİLİTESİ

Dündar Arif EKİNCİ

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ömer ÖZYURT
Ortak Danışman: Prof. Dr. M. Akif CEVİZ

Sağlık Bakanlığı 2012 yılında bir genelge yayınlarak, 20.000 m² ve üzeri kapalı alana sahip yeni inşa edilecek sağlık tesislerinde Bileşik Güç Üretim Sistemi (CCHP, Combined Cooling, Heat and Power, Trigeration) uygulamasını zorunlu hale getirmiştir. Söz konusu genelge sonrası, Erzurum’da inşa edilmesi planlanan 800 yataklı sağlık kampüsü projesinde de Bileşik Güç Üretim Sistemi uygulaması kararlaştırılmıştır.

Bu doğrultuda çalışmanın amacı Erzurum Sağlık Kampüsü için trijenerasyon sisteminin uygulanabilirliğini araştırmak ve inşa edilebilirliğinin etkin ekonomik analizini gerçekleştirmektir. Başka bir deyişle en uygun şartta kullanılabilecek cihazların kapasitelerini ve çalışma şartlarını tespit edebilmektir.

Söz konusu sağlık kampüsünün yapımı henüz tamamlanmadığı için hastanenin yıl boyunca talep edeceği enerji miktarı tahmin edilerek trijenerasyon sistemin en etkin şekilde çalışmasını sağlayan bir simülasyon sistemi oluşturulmuştur. Simülasyonda hastanenin inşa edileceği konumun tüm fiziki şartları (rakım sıcaklık gibi) göz önüne alınarak sistemi oluşturan elemanlar üzerine bir matematiksel model inşa edilmiştir.

Belirlenen efektif çalışma şartları için öncelikle sistemin tüm maliyetleri ayrıntılı olarak çıkarılmış, daha sonra sistemden yıl boyunca üretilecek elektrik enerjisi, ısıtma enerjisi ve soğutma enerjisi miktarı net gelir olarak kaydedilmiştir.

Sonuçlara göre sistemin ağır bakıma kadar olan çalışma periyodu göz önüne alınarak oluşturulan gelir-gider tablosu sayesinde sistemin geri ödeme süresi 2,9698 yıl olarak bulunmuştur.

2013, 140 sayfa

Anahtar kelimeler: Trijenerasyon, Sağlık Bakanlığı, Sağlık Kampüsü, Erzurum

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

FEASIBILITY OF TRIGENERATION SYSTEM APPLIED ON ERZURUM CAMPUS HOSPITAL

Dündar Arif EKİNCİ

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ömer ÖZYURT
Co Advisor: Prof. Dr. M. Akif CEVİZ

The Ministry of Health, issuing public circular in 2009, has made mandatory use of CCHP (Combined Cooling, Heat and Power, Trigeneneration) in the newly constructed health facilities having a closed area of 20.000 m² and more. After this public circular, the use of CCHP has also been agreed for the project of health campus with 800 bed planned to be built in Erzurum.

Accordingly, the aim of this study is to investigate the applicability of the CCHP system which will be used for Erzurum Health Campus and realize the effective economic analysis of its constructability. In other words, it is to identify capacities and operational conditions of the devices to be used in the most appropriate circumstances.

As the health campus has not yet been built, a simulation system, providing the work of trigeneration system effectively, has been constituted by estimating the required amount of energy at the hospital. In the simulation, taking into account all physical conditions of location on which campus has been built (altitude, temperature ext.), a mathematical model has been performed.

For the effective operating conditions, firstly, the cost of system has been specified broadly and then the amount of electrical power, heating and cooling energy produced during one year has been registered as net income.

According to the results, the repayment period of the system has been found as 2,9698 years through income-expense table constituted by considering the operating period ongoing until the heavy maintenance of system,

2013, 140 pages

Keywords: Trigeneneration, Health Ministry, Health Campus, Erzurum

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam esnasında gösterdikleri ilgi, yardım ve teşviklerinden dolayı başta tez yöneticiliğimi üstlenen Sayın Doç. Dr. Ömer ÖZYURT'a ve Sayın Prof. Dr. Mehmet Akif CEVİZ'e çalışma aşamasında bilgi ve tecrübesinden yaralandığım Sayın Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI'ya, ayrıca her türlü yardım ve desteği ile yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Dündar Arif EKİNCİ

Aralık, 2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Ülkemizde Enerji Talebi	3
1.2. Trijenerasyon Sistemi Nedir?	4
1.3. Kojenerasyon Sistemlerinin Genel Prensibi.....	6
1.4. Kojenerasyon Sistemi Elemanları	9
1.4.1. Güç üreticiler	9
1.4.1.a. Buhar türbini.....	10
1.4.1.b. Gaz türbini.....	14
1.4.1.c. Pistonlu motor.....	18
1.4.1.d. Kombine çevrim	22
1.4.1.e. Stirling motorları	23
1.4.1.f. Mikro türbinler	25
1.4.1.g. Yakıt pilleri.....	27
1.4.2. Isı geri kazanım ünitesi.....	30
1.4.3. Jeneratör ve elektrik ekipmanları	32
1.4.4. Kontrol sistemi	33
1.5. Absorpsiyonlu Soğutucu Nedir?	35
1.7. Absorpsiyonlu Soğutma Çevrimi	37
1.7.1. Tek etkili bir absorpsiyonlu çillerin çalışma prensibi	38
1.7.1.a. Evaporatör.....	39
1.7.1.b. Absorber	39
1.7.1.c. Generatör	40
1.7.1.d. Yoğuşurucu	40

1.7.2. Çift etkili LiBr-H ₂ O akışkanlı absorpsiyonlu soğutma sistemi.....	40
1.7.3. Absorbsiyonlu soğutma sisteminin avantaj ve dezavantajları.....	42
1.8. Tez Çalışmasının Amacı	43
2. KAYNAK ÖZETLERİ	44
2.1. Trijenerasyon Çalışmalarına Genel Bakış	44
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	55
3.1. Sistemin Teknik Açısından İncelenmesi	65
3.1.1. Motorun matematiksel modelinin oluşturulması.....	66
3.1.2. Atık ısı kazanı matematik modelinin oluşturulması.....	78
3.1.3. Absorbsiyonlu soğutma sisteminin modellenmesi	81
3.2. Sistemin Ekonomik Açısından İncelenmesi	89
3.2.1. Keşif özeti.....	90
3.2.2. Sabit masraflar.....	90
3.2.2.a. Amortisman hesabı	90
3.2.2.b. Sigorta hesabı	91
3.2.3. Değişen masraflar	91
3.2.3.a. Yakıt giderleri.....	92
3.2.3.b. İşçilik giderleri	92
3.2.3.c. Tamir ve bakım giderleri	93
3.2.3.d. Yağlama giderleri	96
3.2.4. Gelir gider tablosu	96
3.2.4.a. Elektrik tarife fiyatları	97
3.2.5. Geri ödeme süresinin belirlenmesi	98
3.3. Sistemin Simülasyon Programı	98
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	101
4.1. Sistemin Teknik Analizinde Elde Edilen Bulgular	101
4.1.1. Gaz Motorunun matematiksel modelinin oluşturulması ile elde edilen bulgular	101
4.1.2. Atık ısı kazanının matematiksel modelinin oluşturulması ile elde edilen bulgular	105
4.1.3. Absorbsiyonlu soğutma sisteminin matematiksel modelinin oluşturulması ile elde edilen bulgular	106

4.2. Sistemin Çalışma Rejimini Belirlenmesi	110
4.3. Trijenerasyon Sisteminin Ekonomik Analizi Sonucu Elde Edilen Bulgular	124
4.3.1. Keşif özeti nin çıkarılması.....	124
4.3.2. Sistem için yıllık sabit masrafların belirlenmesi	125
4.3.2.a. Amortisman maliyeti	125
4.3.2.b. Sigorta maliyeti	125
4.3.3. Sistem için yıllık değişen masrafların belirlenmesi	125
4.3.3.a. Yakıt giderleri.....	125
4.3.3.b. İşçilik giderleri	126
4.3.3.c. Tamir ve bakım giderleri	126
4.3.3.d. Yağlama gideri	127
4.3.4. Gelir gider tablosu	128
4.3.5. Sistemin geri ödeme süresinin belirlenmesi	130
5. SONUÇ	131
KAYNAKLAR	137
ÖZGEÇMİŞ	141

SİMGELER DİZİNİ

A	Isı transfer yüzey alanı (m^2)
AÖN	Alt ölü nokta
AO	Akış oranı
C	Sıkıştırma oranı
c_p	Sabit basınçta özgül ısı ($kJ.kg^{-1}.K^{-1}$)
C_K	Yıllık amortisman maliyeti
COP	Performans katsayısı
D	Silindir çapı
E	Toplam enerji (kj)
f	Yıllık faiz oranı
Gi	Yıllık net kazanç
Gy	İlk yatırım maliyeti
h	Entalpi
I	Blowby katsayısı (sn^{-1})
L	Biyel kolu uzunluğu (m)
$\dot{m}$	Kütleli debi
n	Motor devir sayısı (d.dak. $^{-1}$)
P	Basınç (kPa)
Q	Isı transferi (kj)
T	Sıcaklık (K)
tg	Geri ödeme süresi
U	Toplam ısı transfer katsayısı ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
u	Özgöl iç enerji ($kJ.kg^{-1}.K^{-1}$)
ÜÖN	Üst ölü nokta
W	İş (kj)
X	LiBr konsantrasyonu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kaynaklar bazında genel enerji talebi, 2005-2020	3
Şekil 1.2. Türkiye’de son 10 yıl da dış ticaret ve enerji ithalatı	3
Şekil 1.3. Türkiyede elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kaynaklar	4
Şekil 1.4. Konvansiyonel ve kojenerasyon sistemle elektrik üretimi verim farkı	5
Şekil 1.5. Enerji akış şeması	6
Şekil 1.6. Klasik bir kojenerasyon sisteminin üretim şeması	7
Şekil 1.7. Konvansiyonel sistemler ile kojenerasyon sisteminin kıyaslanması	8
Şekil 1.8. Buhar türbini çevrimli kojenerasyon prensip şeması	11
Şekil 1.9. Kondensli ve kondenssiz türbinler	12
Şekil 1.10. Gaz türbini çevrimli kojenerasyon sistemi prensip şeması.....	16
Şekil 1.11. Diesel ve gaz motorlu kojenerasyon sistemi	20
Şekil 1.12. Buhar ve gaz türbini kombine çevrimli kojenerasyon sistemi prensip şeması	22
Şekil 1.13. Stirling motorlu kojenerasyon sistemi	24
Şekil 1.14. Mikrotürbinli kojenerasyon prensip şeması	26
Şekil 1.15. Yakıt pili prensip şeması	29
Şekil 1.16. Kojenerasyon ile trijenerasyon arasındaki farkın şematik gösterimi.....	34
Şekil 1.17. Faraday’ın absorbsiyon deney aygıtı	36
Şekil 1.18. Tek etkili LiBr–H ₂ O çözeltili absorbsiyonlu soğutma sistemi şematik gösterimi.....	39
Şekil 1.19. Çift etkili LiBr –H ₂ O çözeltili absorbsiyonlu soğutma sistemi şematik gösterimi.....	41
Şekil 2.1. Hastanenin aylık elektrik talebi (MWhe)	50
Şekil 2.2. 2500 ve 1500kWe kapasite ile çalışan iki dizel motorlarla üretilen aylık elektrik dengesi	51
Şekil 2.3. 2650 ve 1350kWe kapasite ile çalışan iki Gaz Türbini ile üretilen aylık elektrik dengesi	51
Şekil 2.4. Gaz türbinli ve dizel motorlu kojenerasyon sistemlerinin elektrik üretim maliyetlerinin karşılaştırılması.....	52

Şekil 3.1. En düşük elektrik tüketiminin olduğu Nisan ayı saatlik elektrik tüketim değeri.....	60
Şekil 3.2. Yüksek elektrik tüketiminin olduğu Ocak ayı saatlik elektrik tüketim değeri.....	60
Şekil 3.3. En yüksek elektrik tüketiminin olduğu Ağustos ayı saatlik elektrik tüketim değeri.....	61
Şekil 3.4. Sistemde kullanılacak her bir motorun teknik özellikleri.....	62
Şekil 3.5. Sistemin şematik resmi.....	66
Şekil 3.6. Açık termodinamik sistem olarak yanma bölgesinin şeması.....	68
Şekil 3.7. Açık termodinamik sistem olarak motorda üretilen ısıyı kullanmak için oluşturulan sistem şeması.....	79
Şekil 3.8. Tek etkili absorpsiyonlu soğutma sisteminin elemanları	81
Şekil 3.9. Gaz motorlarına yapılan bakımlar.	94
Şekil 3.10. Ağır bakıma kadar gaz motorlarına yapılan bakım periyotları.....	94
Şekil 3.11. Program algoritması	100
Şekil 4.1. Motor yüküne bağlı olarak elde edilen mekanik güç çıktısı.....	101
Şekil 4.2. Motor yüküne bağlı olarak motorun tüketeceği doğal gaz miktarı	102
Şekil 4.3. Motor yüküne bağlı olarak egzozdan atılan gaz debisindeki değişim	102
Şekil 4.4. Motor yüküne bağlı olarak egzoz gazlarının özgül ısı değerindeki değişim	103
Şekil 4.5. Motor yüküne bağlı olarak egzoz gazlarının sıcaklığındaki değişim	103
Şekil 4.6. Motor yüküne bağlı olarak egzozdan alınan ısı değerindeki değişim.	104
Şekil 4.7. Motor yüküne bağlı olarak egzozdan alınan ısı değerindeki değişim	104
Şekil 4.8. Motorun yükündeki değişime bağlı olarak motor ceketinden alınan ısı ile ısıtılan suyun çıkış sıcaklığındaki değişim.....	105
Şekil 4.9. Motorun yükündeki değişime bağlı olarak egzoz gazlarından alınan ısı ile ısıtılan suyun çıkış sıcaklığındaki değişim.....	106
Şekil 4.10. Soğutma performans katsayısı COP'nin generatör giriş sıcaklığına göre değişimi	107
Şekil 4.11. Soğutma performans katsayısı COP'nin generatör sıcaklığının bir fonksiyonu olarak farklı kondanser sıcaklıklarında değişim eğrisi.....	108

Şekil 4.12. Soğutma performans katsayısı COP'nin generatör sıcaklığının bir fonksiyonu olarak farklı evaporatör sıcaklıklarında değişim eğrisi	108
Şekil 5.1. Sistemin Ocak ayında tahmin edilen çalışma senaryosu	132
Şekil 5.2. Sistemin Ağustos ayında tahmin edilen çalışma senaryosu	133
Şekil 5.3. Sistemin Nisan ayında tahmin edilen çalışma senaryosu	133

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. En çok kullanılan kojenerasyon sistemlerinin özellikleri.....	10
Çizelge 1.2. Buhar türbinli sistemlerin maliyetleri.....	14
Çizelge 1.3. Gaz türbinli sistemlerin maliyetleri	18
Çizelge 1.4. Motorlu sistemlerin maliyetleri	22
Çizelge 1.5. Stirling motorlu sistemlerin maliyetleri.....	25
Çizelge 1.6. Mikro türbinli kojenerasyon sistemlerin maliyetleri	27
Çizelge 1.7. Yakıt pilli sistemlerin maliyetleri	30
Çizelge 2.1. Waukesha onayı verilen sistemin sayısal analizi.....	46
Çizelge 2.2. Waukesha onayı verilen sistemin ekonomik analizi.....	47
Çizelge 3.1. Erzurum için, meteoroloji genel müdürlüğü resmi istatistik değerleri	59
Çizelge 3.2. Ocak ayı için hastanenin talep ettiği elektrik ihtiyacını karşılayacak motorların saatlik çalışma yükleri	62
Çizelge 3.3. Nisan ayı için hastanenin talep ettiği elektrik ihtiyacını karşılayacak motorların saatlik çalışma yükleri	63
Çizelge 3.4. Ağustos ayı için hastanenin talep ettiği elektrik ihtiyacını karşılayacak motorların saatlik çalışma yükleri	64
Çizelge 3.5. Bir motor turunda emme, sıkıştırma, iş, genişleme ve egzoz zamanı için motor modelinde kullanılacak denklem takımlarının uygulamaları	77
Çizelge 3.6. LiBr-su eriğinin entalpisinin hesabı için denklem katsayıları	87
Çizelge 3.7. LiBr-su eriğinin yoğunluğunun hesabı için denklem katsayıları.....	88
Çizelge 3.8. LiBr-su eriğinin doyma sıcaklığının hesabı için denklem katsayıları	88
Çizelge 3.9. KDV dahil yakıtın üst ısı değeri bazında doğalgaz fiyatı.....	92
Çizelge 3.10. Gaz motorlarının yıllık çalışma süresi	93
Çizelge 3.11. Motorların yıllık bakım periyodu	95
Çizelge 3.12. 01.06.2013 Tarihi itibariyle uyulan tedarik tarife fiyatları.....	97
Çizelge 4.1. %100 Motor yükünde alınan ısı enerjisine göre absorpsiyonlu sistemin çalışma şartları.....	109
Çizelge 4.2. Motor yüküne göre yakılan yakıt miktarı ve sistemden sağlanan enerji miktarları	110

Çizelge 4.3. Ocak ayı sistemin çalışma senaryosu	111
Çizelge 4.4. Şubat ayı sistemin çalışma senaryosu.....	112
Çizelge 4.5. Mart ayı sistemin çalışma senaryosu	113
Çizelge 4.6. Nisan ayı sistemin çalışma senaryosu.....	114
Çizelge 4.7. Mayıs ayı sistemin çalışma senaryosu	115
Çizelge 4.8. Haziran ayı sistemin çalışma senaryosu	116
Çizelge 4.9. Temmuz ayı sistemin çalışma senaryosu.....	117
Çizelge 4.10. Ağustos ayı sistemin çalışma senaryosu.....	118
Çizelge 4.11. Eylül ayı sistemin çalışma senaryosu	119
Çizelge 4.12. Ekim ayı sistemin çalışma senaryosu	120
Çizelge 4.13. Kasım ayı sistemin çalışma senaryosu	121
Çizelge 4.14. Aralık ayı sistemin çalışma senaryosu.....	122
Çizelge 4.15. Yıllık sistemin üreteceği enerji miktarları ve tüketeceği enerji miktarı .	123
Çizelge 4.16. Sistemin aylara göre düzenlenmiş tüketeceği yakıt miktarı ve tutarı	126
Çizelge 4.17. Sistemin aylara göre düzenlenmiş işçilik maliyetleri	126
Çizelge 4.18. Ağır bakım süresine kadar bulunan sistemin bakım masrafları.....	127
Çizelge 4.19. Gaz motorlarının çalışma süresine göre sistemin tüketeceği yağ miktarı ve tutarı	127
Çizelge 4.20. Ağır bakım süresine kadar yıllara göre düzenlenmiş gelir gider tablosu	129

1. GİRİŞ

Son on yıl içerisinde dünyadaki hastanelerin finansal güçlüklerinin artmasıyla hastane maliyetlerinin artmasına ve kârlılığının azalmasına neden olmuştur. Son küresel ekonomik durgunlukla hastanelerin kârlılığı iyice düşmüş ve bütçe denkleştirmek için çeşitli maliyet düşürücü önlemleri almanın yolları araştırılmıştır. Hem özel hem de kamu hastane yöneticileri bütçe kısıtlamalarına gitmişlerdir. Buna ek olarak 2050 yılına kadar dünya nüfusunun 60 yaş üzeri yaşlanmış popülasyonunun, 600 milyondan 1 milyara yaklaşık iki kat artış göstereceği istatistiksel olarak ortadadır. Buda potansiyel hasta sayısının artacağına ve bu hastalar için verilecek hastane hizmetlerinin artması anlamına gelmektedir. Hastaneler daha azıyla daha çok hizmet verebilmenin yollarını bulmak zorundadır (Mandıracıoğlu 2010).

Nüfus artışına paralel olarak enerji maliyetleri 1995’den buyana tüm Dünyada yaklaşık olarak %25 oranında artış göstermiş, önümüzdeki beş yıl ise %25 oranında artması beklenmektedir (Mandıracıoğlu 2010).

Sağlık pazarında enerji kullanımı ise hasta sayısındaki artışın yanı sıra teknoloji değişimi ve nitelikli sağlık hizmeti sunumu gereksinimlerinden dolayı 1995 den buyana %36 artış göstermiştir (Schneider 2010).

Son yıllarda enerji maliyetlerindeki artışlar ve sağlıkta enerji kullanımına olan eğilim artışı enerji verimliliğini artıran projeleri popüler kılmaktadır. Artan enerji maliyetleri enerji verimliliği projelerine yatırım yaparak azaltılabilir ve hastanelerin gelişimini artırmak için yeniden yatırım olarak kullanılabilir.

Peki, neden enerji maliyetleri göz ardı ediliyor? Çünkü enerji maliyetleri bir hastanenin işletme maliyetlerinin %10’nu temsil etmektedir. Ve bu sonuç hastane yöneticilerini genel maliyetleri düşürme noktasına itmektedir. Bunların başında personel sayıları ve /veya personel yararlarını azaltmak, hastaların iyileştirme süreçlerini hızlandırmak gibi

yöntemler gelmektedir. Oysa 400 yatak kapasitesine sahip Ankara Eğitim ve Araştırma Hastanesinin 2010 yılına ait toplanan enerji faturaları incelendiğinde; hastanenin 2010 yılına ait toplam elektrik giderlerinin 2.325.000TL ve hastaneye ait 2010 yılı toplam doğalgaz giderlerinin 488.651TL olduğu görülmüştür. Ödenen bu fatura bedelleri azımsanmayacak kadar çok meblağlardır.

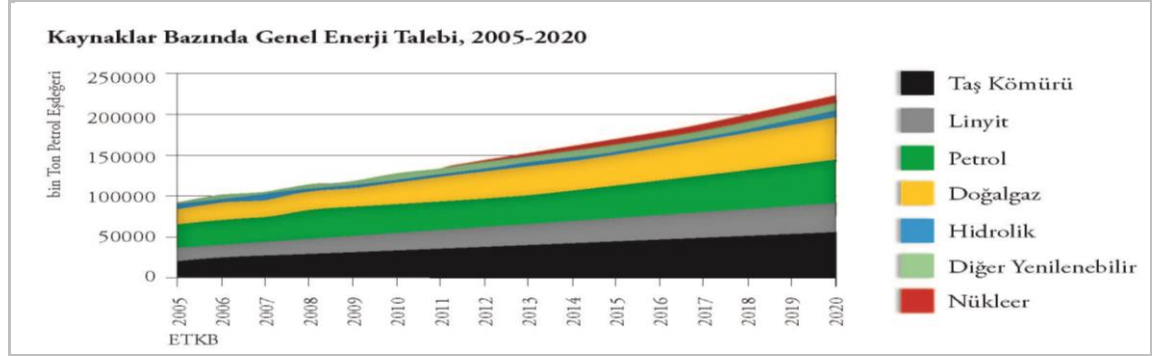
Hasta bakımı seviyesini veya hastane personeli davranışını etkileyen diğer maliyetleri düşürücü yaklaşımların aksine enerji verimliliği ile finansal iyileştirme sağlanabilir. Hastanelerindeki gerçek zamanlı enerji kullanımı ihtiyacının belirlenmesi ve enerji maliyetlerinde %30'luk bir tasarruf sağlanması hastane işletme maliyetlerinde yaklaşık %5'lik bir kârlılığa denk gelmektedir ki bu 235 yataklı bir hastanede yataklı hastalar için harcanacak 28 günlük maliyete denk gelmektedir.

Bu değerler iklim kuşağına, mevcut hastanenin enerji yoğunluğuna (ameliyathanelerin sayısı ve tipine teknolojiyi kullanım durumuna göre) bağlı olarak hastaneden hastaneye değişir. Enerji maliyetlerini azaltmak hastane finansal performansı üzerinde önemli ve pozitif bir etkiye sahip olabileceğinin bir kanıtı olmaktadır.

Bunun yanı sıra sağlık sektörü çevreye duyarlı olması gereken en baştaki sektörlerden biridir. Bugün dünya enerji tüketim talebinin %85'i fosil yakıtlardan karşılanmaktadır (Çolak vd 2005). Talebin büyük çoğunluğunun fosil yakıtlardan karşılanması sebebiyle ısınan dünyada iklim değişimleri yaşanmaktadır. Enerji sorununa çözüm bulunmadığı takdirde ekosistem bozulacak, bitki ve hayvan türleri yok olacaktır. Klasik konvansiyonel enerji üretim süreci çevreyi ciddi şekilde etkilemektedir. CO₂ salınımı bu süreçte çevreye önemli etki yapmakta ve sera gazı etkisi oluşturmaktadır. Hastaneler enerjiye olan talepleri açısından ağır sanayiden sonra gelen en önemli enerji tüketen tesislerden biridir. Ülkemiz kısıtlı enerji kaynaklarına sahip enerji'de dışa bağımlı bir ülkedir. Bu nedenle enerjinin son yıllarda üretim ve kullanım aşamasında verimliliğin artırılması kayıpların en az düzeyde tutulması daha fazla önem kazanmaya başlamıştır.

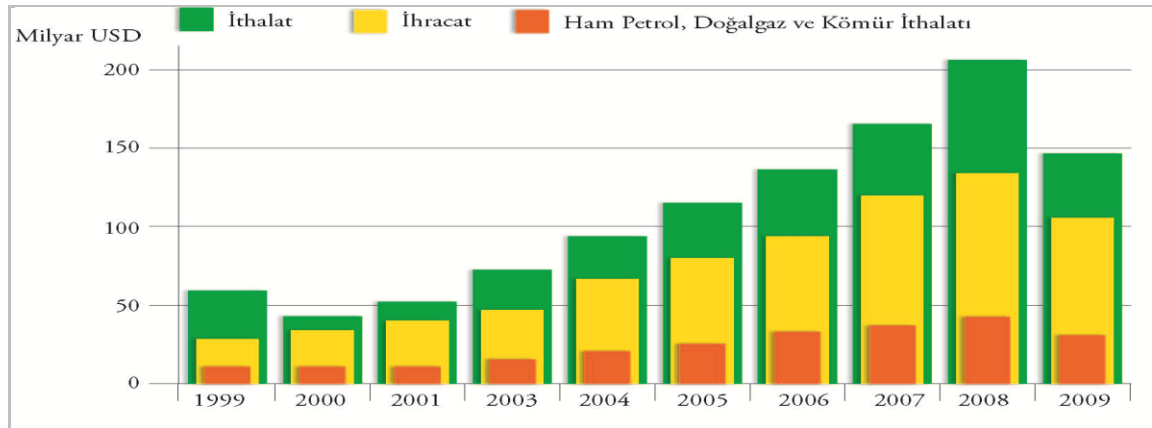
1.1. Ülkemizde Enerji Talebi

Enerji Bakanlığının hazırlamış olduğu veriler ışığında ülkemizde 2020 yılına kadar beklenen kaynaklar bazındaki enerji talebi Şekil 1.1’de verilmiştir (Anonim 2013).



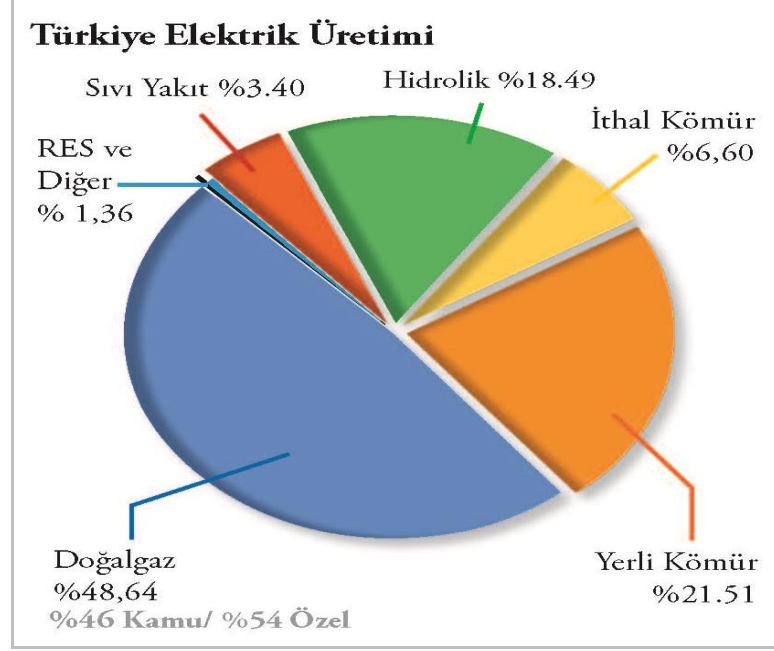
Şekil 1.1. Kaynaklar bazında genel enerji talebi, 2005-2020

İthalatımızda enerjinin payı oldukça yüksektir. Son on yıl içerisinde ülkemizin yaptığı ihracat ve ithalat miktarları içerisinde enerji ithalatını gösteren grafik Şekil 1.2’de verilmektedir. 2000-2009 yılları arasında yapılan toplam ihracatımız 706 milyar dolardır. toplam ithalatımız 1083 milyar dolardır. Ham petrol, doğalgaz ve kömür ithalatı ise 154 milyar dolardır. Buda dış ticaret açığının %41’ine tekabül etmektedir (TÜİK 2012).



Şekil 1.2. Türkiye’de son 10 yıl da dış ticaret ve enerji ithalatı (TÜİK 2012)

Türkiye ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisini üretmek için Şekil 1.3’de verilen pasta diliminde gösterildiği oranda kaynakları kullanmaktadır. Fosil yakıtlar kullanılarak sağlanan elektrik üretim oranı %81.51 civarındadır. Bu da elektrik üretiminde de dışa bağımlı olduğumuzun bir göstergesidir.



Şekil 1.3. Türkiyede elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kaynaklar (Anonim 2013)

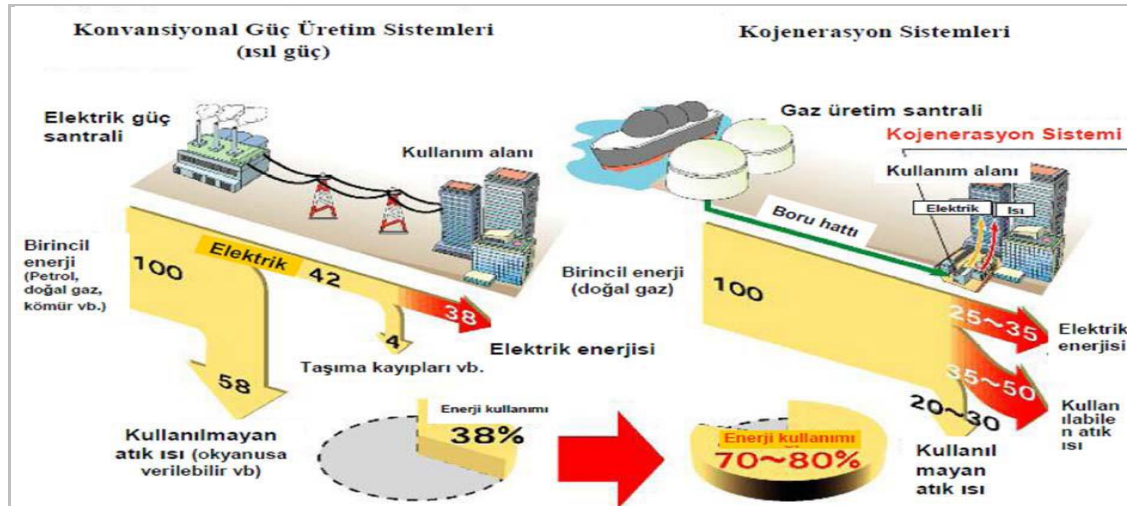
Hastaneler elektrik enerjisi talebi sanayiden sonra en yüksek olan müşteridir. Türkiye’de bulunan hastaneler için bir enerji verimliliği projesi oluşturmak, yapılması gereken önemli konuların başında gelmektedir. Bunun için hastanelerde çalışılması gereken önemli projelerden biri trijenerasyon sistemleridir.

1.2. Trijenerasyon Sistemi Nedir?

Eş zamanlı olarak ısı–güç üretimi sağlayabilen bir kojenerasyon sitemine ilave edilen absorbsiyonlu soğutma sistemi ile atık ısıdan soğutma enerjisi de üretmeyi başaran üçlü bir sistemdir.

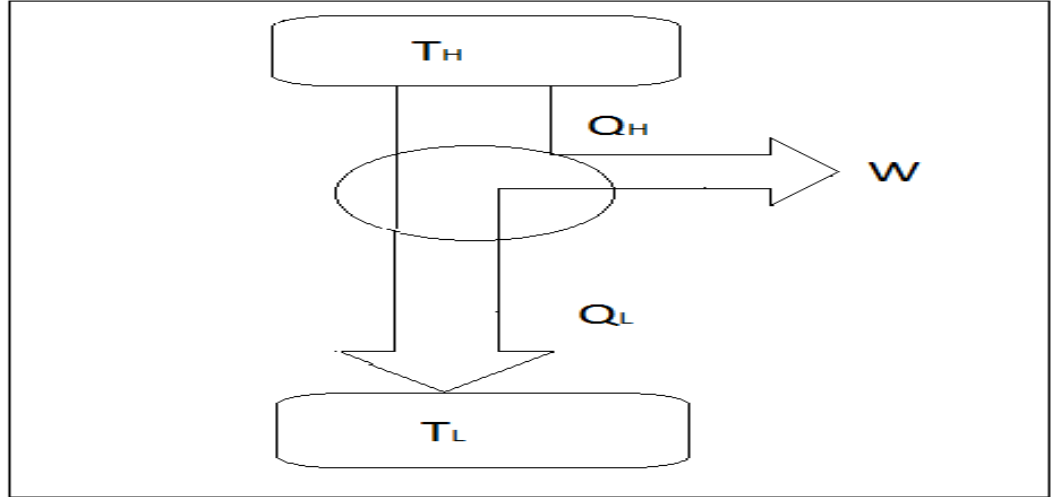
Kojenerasyon diğer adıyla bileşik ısı ve güç sistemi tek bir sistemden eş zamanlı olarak elektrik ve/veya mekanik güç ile kullanılabilir ısı üretilmesi demektir. Bu sistemden elde edilen atık ısıdan yararlanıp soğutma enerjisini de sağlayan sistemler üçlü enerji sağlayıcısı olan trijenerasyon sistemleridir.

Konvansiyonel enerji üretim sistemleri (termik santrallerde elektrik, kazanlarda ısı üretimi) çevreyi kirletmekte ve primer enerjinin yaklaşık %55-65'i atık ısı olarak ziyan olduğundan hiç ekonomik olmamaktadır. Buna karşılık bir kojenerasyon sisteminde elektrik üretimi sırasında ortaya çıkan ısı, eşanjörler yardımı ile çeşitli ısı ihtiyaçları için (Sıcak su, buhar, absorpsiyonlu soğutma vb.) değerlendirilebilmektedir. Şekil 1.4'de konvansiyonel sistem ile elektrik üretimine karşı kojenerasyon sistemi ile elektrik üretimi arasındaki verim farkı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Konvansiyonel ve kojenerasyon sistemle elektrik üretimi verim farkı (Sancar 2010)

Temel olarak kojenerasyon sistemi tüm ısı makinelerinin çevreye vermek zorunda oldukları atık ısıdan yararlanmayı amaçlar. Şekil 1.5'de bir ısı makinesinin enerji akış şemasında da görüleceği üzere, ısı makinesinde üretilen işin (W), alınan ısı enerjisine (Q_H) oranı, ısı verim (η)'dir.



Şekil 1.5. Enerji akış şeması

Bu ısı verime kojenerasyon uygulamalarında elektrik çevrim verimi adı da verilmektedir. Çevreye aktarılan ısı enerjisi, Q_L , kojenerasyon sisteminde kullanılan ısıdır. Böylece enerjiden yararlanma oranı (EYO) maksimum düzeye çıkartılmaktadır.

$$EYO = \frac{W + Q_L}{Q_H}$$

EYO'na kojenerasyon uygulamalarında toplam verim de denilmektedir. Her ne kadar EYO, termodinamiğin birinci yasasına göre "1" olabilse de, uygulamada atık ısının tümünden yararlanılamadığından bu mümkün olmamaktadır. Bu atık ısıdan, doğrudan ısı olarak yararlanılmadıkça, %35-55 aralığında uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Oysa atık ısıdan, yine ısı olarak faydalanılan kojenerasyon sisteminde toplam sistem verimini yani Enerjiden Yararlanma Oranını (EYO) %80- 90'lara çıkarmak mümkün olmaktadır. (Akdeniz vd 2007)

1.3. Kojenerasyon Sistemlerinin Genel Prensibi

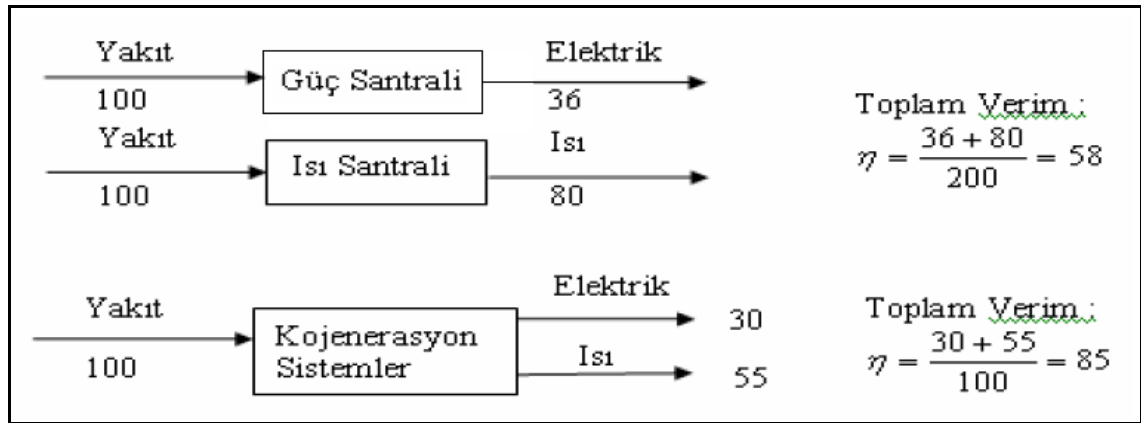
Geleneksel yollarla elektrik üretiminde ortalama verim %35 ve kayıplar ise atık ısı veya başka şekilde olmak üzere toplam %65'lerdedir. Geleneksel yollarla kullanım

noktalarından çok uzak mesafelerde elektrik üretilmesi durumunda üretilen elektriğin yaklaşık %10 ile 25'i dağıtım santrallerinde ve buradan kullanım yerlerine iletilmesi esnasında kayıp olarak verilmektedir. Kojenerasyon sistemlerinde ise sistemin türüne bağlı olarak elektrik üretimindeki verim %45'lere kadar çıkabilmektedir. Sistemde elektrik üretimi esnasında oluşan ısı enerjisi çekilerek atık ısı değerlendirme sistemlerinde (atık ısı kazanları) kullanılabilir ısı enerjisine dönüştürülebilir. Elde edilen enerji konut ısıtma-soğutmasında ya da endüstriyel tesislerde amacına uygun olarak kullanılır. Bu sayede toplam verim %90'lara kadar çıkabilmektedir (Casten *et al.* 2003). Şekil 1.6'da elektrik üretimi sırasında oluşan atık ısının da kullanılması ile birlikte kojenerasyon sistemlerinin verimliliği görülmektedir. Bunun yanında kojenerasyon sistemleri yerel olarak kurulduğu için yukarıda bahsi geçen iletim kayıpları da ihmal edilebilir seviyelere gerilemektedir. Bu yüzden kojenerasyon sistemleri konvansiyonel sistemlerle karşılaştırıldığında elektrik üretiminde %8 ile %17 arasında değişen oranlarda enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca yerel elektrik üretimi demek daha ergonomik olarak elektriğin üretilip kullanıma sunulması anlamına da gelmektedir. çünkü konvansiyonel sistemler (hidroelektrik santraller, termik santraller vs.) genellikle tüketim bölgelerinden çok uzak yerlere kurulduğu için elektriğin iletilmesi için çok uzun mesafelere iletim hatları yapmanın zorluğu, maliyeti ve kayıpları dikkate alınması gereken önemli etkenlerdir. Bunların yanı sıra zor doğa koşulları ve iklim şartları hem iletim hatlarının inşasının hem de kurulum sonrasında bakım ve olası aksaklıkların tamiri bakımından olumsuz etkilemektedir (Hernoe *et al.* 2004).



Şekil 1.6. Klasik bir kojenerasyon sisteminin üretim şeması

Kojenerasyon sistemleri genellikle mümkün olduğunca ısının ve elektriğin kullanıldığı yere yakın kurulduğu için hem daha az kayıp verir hem de yukarda bahsi geçen bakım ve tamir zorluklarının birçoğundan uzak olur. Ayrıca ihtiyaç duyulan enerji miktarına çok yakın kapasitede tasarlanırlar. Konvansiyonel sistemlerde ise olası kayıplar göz önüne alınarak tüketiciye sunulan enerji miktarının biraz daha üstünde kapasitede üretim yapan tesisler tasarlamak gerekir. Bu daha büyük kapasiteli sistemlerin kurulacağı anlamına gelir. Dolayısıyla konvansiyonel sistemlere nazaran ilk kurulum maliyeti açısından da avantajlıdır (Anonim 2012). Şekil 1.7’de konvansiyonel sistem ile kojenerasyon sisteminin verimleri kıyaslanmıştır.



Şekil 1.7. Konvansiyonel sistemler ile kojenerasyon sisteminin kıyaslanması (Çakır 2007)

Kojenerasyon sistemlerinde en genel halde iki ana parametre öne çıkmaktadır. Bunlar sistem kurulacak olan tesisin ısı ve elektrik ihtiyaçlarıdır. İhtiyaç düzenlemelerin ve dağıtım şirketi ile yapılabilecek anlaşmaların elverdiği oranda ihtiyaç fazlası miktar dağıtım şirketine satılabilir. Bunun aksi olması durumunda ise eksik kalan enerji miktarı ulusal dağıtım şirketinden temin edilmektedir. Eğer kojenerasyon tesisi ihtiyaç duyulan ısı ihtiyacının tamamının karşılanması üzerine tasarlanırsa birinci durum yani şebekeye elektrik satma durumu ortaya çıkacaktır. Eğer tasarlanan sistem gerek duyulan tesisin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamaya yönelik dizayn edilirse bu durumda da tesisin ısı enerjisi ihtiyacını karşılamak için ilave ısı kazanları sisteme dâhil edilmek sureti ile fazladan yakıt yakılarak bu sorun giderilebilmektedir (Hernoe 2004).

1.4. Kojenerasyon Sistemi Elemanları

Kojenerasyon sistemleri genel olarak dört ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar;

- Güç üretici
- Isı geri kazanım ünitesi
- Jeneratör ve elektrik ekipmanları
- Kontrol sistemi

olarak sıralanabilir.

1.4.1. Güç üreticiler

Kojenerasyon sistemleri genellikle güç üretici, jeneratör ve kullanılan yakıt tipine göre sınıflandırılmaktadır. Günümüzde kojenerasyon sistemlerinde kullanılmakta olan güç üreticiler genellikle;

- Buhar türbinleri,
- Pistonlu motorlar,
- Gaz türbinleri,
- Kombine çevrim,

Olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak bunların yanında yeni gelişmekte olan güç üreticiler;

- Yakıt pilleri,
- Stirling motorları,
- Mikro türbinler,

ekonomik olarak uygulanabilir hale gelerek kojenerasyon pazarında yer almaya başlamışlardır.

Aşağıdaki Çizelge 1.1’de en çok kullanılan kojenerasyon sistemi tiplerini, bu sistemlerin kullanıldıkları tipik kapasite aralıklarını, ısı güç oranlarını, verimlerini ve ısı kalitelerini özetlemektedir.

Çizelge 1.1. En çok kullanılan kojenerasyon sistemlerinin özellikleri (The European Cogen Study 2001)

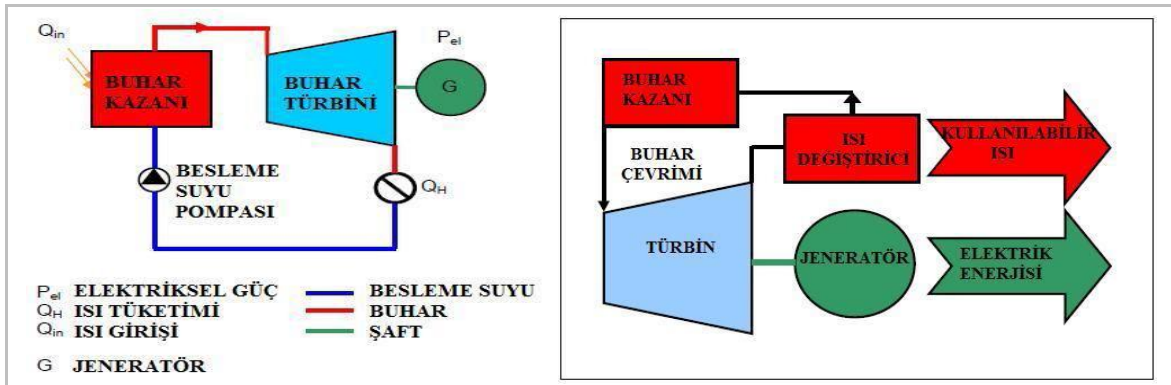
Tipi	Kullanılan Yakıt	Kapasite MWe	Isı: güç oranı	Elektrik Üretim Verimi	Sistem Verimi	Isı Kalitesi
Buhar türbini	Bütün Yakıtlar	1-100	3:1-8:1+	%10-20	%80	Buhar basıncı 2 bar ve üzeri
Basınçlı buhar türbini	Bütün Yakıtlar	0,5-500	3:1-10:1+	%7-20	%80	Buhar basıncı 2 bar ve üzeri
Kombine Çevrimli Gaz Türbini	Gaz, Biyogaz Nafta, Doğalgaz, LFO	3-300	1:1-3:1*	%35-55	%73-90	Yüksek Sıcaklıkta sıcak su orta derecede buhar
Açık çevrim gaz türbini	Gaz, Biyogaz LPG, Nafta, Doğalgaz, LFO, HFO	0,25-50	1,5:1-5:1*	%25-42	%65-87	Yüksek Sıcaklıkta sıcak su yüksek derecede buhar
Diesel Motoru	Gaz, Biyogaz LPG, Nafta, Doğalgaz, LFO, HFO	0,2-20	0,5:1-3:1*	%35-45	%65-90	Düşük Basınçlı Buhar orta ve düşük sıcaklıklı su
Gaz Motoru	Gaz, Biyogaz Nafta, Doğalgaz	0,003-6	1:1-3:1	%25-43	%70-92	Düşük ve orta sıcaklıktaki sıcak su

* İşaretili Değerlere Ancak Ek Yakma İle Ulaşılabilmektedir.

1.4.1.a. Buhar türbini

Günümüzde elektrik üretimi için en çok tercih edilen yöntemlerin başında Rankine çevrimi prensibine göre tasarlanmış buhar türbin sistemleri gelmektedir. Dünyada katı yakıt kullanarak ve nükleer enerjiden faydalanarak elektrik üreten santrallerin neredeyse

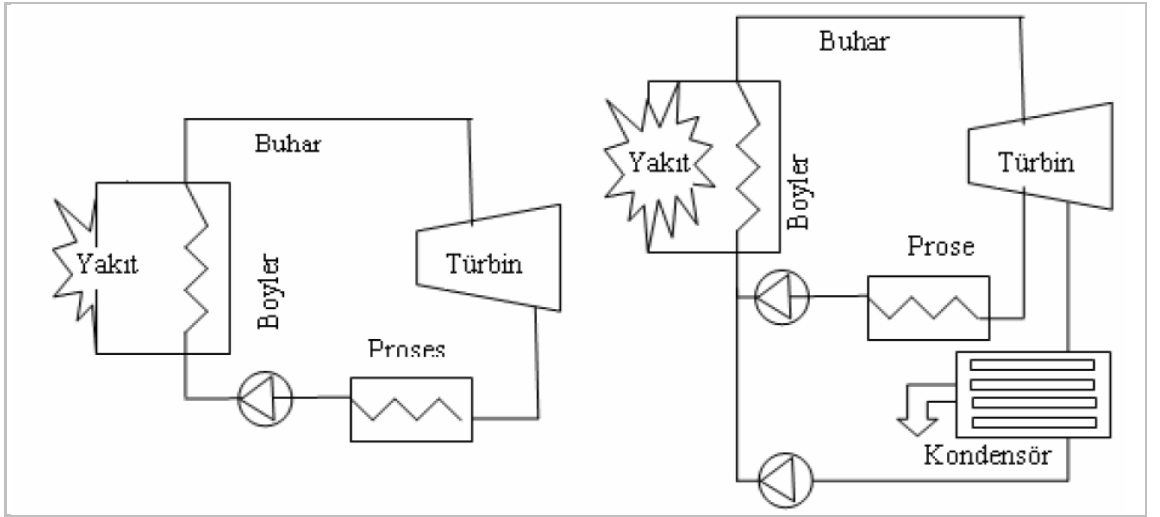
tamamında buhar türbinleri tercih edilmektedir. Ayrıca doğalgaz veya sıvı yakıt kullanan santrallerin çoğunda da aynı yöntem tercih edilmektedir. Şekil 1.8’de şematik olarak gösterilen buhar türbini çevrimli kojenerasyon sisteminde suya fazla miktarda ısı enerjisi verilerek elde edilmiş olan yüksek basınçlı buhar çok yüksek hızda türbinlere gönderilir. Jeneratörle irtibatlı olan şaft tahrik edilmek sureti ile elektrik jeneratörünü döndürmekte kullanılabilecek mekanik enerjiyi üretmek üzere türbinde genişletilmektedir. Üretilen elektrik enerjisinin miktarı, buhar basıncının ne kadar düşürülebildiğiyle ilgilidir. Bu sistem gaz türbinli sistem ve pistonlu motorlu sistemlere göre daha fazla toplam verime sahip olsa da birim yakıt başına elektrik enerjisi üretimi bu iki sistemden daha azdır. Uygulanabilir bir güç üretimi için buhar girişi yüksek sıcaklık ve basınçta olmalıdır.



Şekil 1.8. Buhar türbini çevrimli kojenerasyon prensip şeması

artık ısı çıkışı göreceli olarak düşük bir derecededir. Tipik buhar giriş şartları 42bar/400°C veya 63bar/480°C’dir. Buhar çıkış şartlarını ise prosesin gerektirdiği sıcaklıklar belirler. Türbin giriş basıncı arttıkça buhar türbininden elde edilen güç artar ancak yüksek buhar basıncı büyük kapasiteli kazan gerektirir bu da yatırım maliyetini ve işletme maliyetlerini arttırır. Bu yüzden optimum basınç santral kapasitesine ve prosesler için gerekli buhar basıncına göre belirlenir. Buhar çevrimlerinin avantajı buharın üretildiği kazanın herhangi bir yakıt tipiyle, gaz, ağır fuel oil, kömür, atıklar ve sıklıkla bunlardan birkaçıyla çalışabilmesidir. Güç çıkışları genellikle 500 kW’dan daha fazladır. Buhar türbinleri genel olarak yoğunlaştırıcı ve karşı basınçlı sistemler olmak

üzere iki kısma ayrılır. Şekil 1.9’da iki sistem şematik olarak gösterilmiştir. Toplam verim kondensli sistemlerde %20 ile %30 arasında, karşı basınçlı türbinlerde ise %80 ile %90 arasında değişmektedir. Bu sistemlerde öncelikli olarak amaçlanan, güç üretimini artırabilmektir. Günümüzde güç üretim amaçlı kurulan sistemlerde verimi %60’lara çıkarabilmenin yolları aranmaktadır. Ortalama olarak ulaşılabilen verim değeri %30- 40 arasındadır. Sisteme verilen toplam yakıt enerjisinin üçte ikisi atık ısı enerjisi olarak atmosfere verilmektedir (Çakır 2007).



Şekil 1.9. Kondensli ve kondenssiz türbinler (Anonymous 2003)

Merkezi güç üretim santrallerinde kondensli sistemler tercih edilmektedir. Güç üretimi esnasında sistemde üretilen ısı enerjisinin değerlendirilebilme imkânı olmadığı için bu yöntem diğerine nazaran ekonomiklikten uzaktır. Merkezi olmayan santrallerde ise tam tersi bir durum vardır. Kojenerasyon sistemlerinde santralin termal enerjiye ihtiyaç duyan yerlere inşa edilmesi ve konvansiyonel sistemlerdeki gibi iletim kayıplarının (%25) olmamasının sonucu olarak birim enerji maliyeti oldukça azdır.

Karşı basınçlı türbinler: yoğunlaştırmasız türbinlerde yüksek basınçlı buhar türbinlerden geçirilmek kaydıyla genişletirilir. Çıkan buhar termodinamik özelliklerine bağlı olarak ikincil düşük basınç türbinlerinden geçirilebilir ya da direk ısıtma amaçlı proseslerde

kullanılabilir. Buhar türbinden geçerken çeşitli noktalarda farklı bir amaç için çıkarılabilir. Ancak bu durumda güç üretim verimi düşecektir.

Karşı basınçlı buhar türbinlerin avantajları:

- Kojenerasyon verimi %80 gibi yüksek değerlere çıkabilir.
- Biyokütle ya da endüstriyel atıklar dâhil olmak üzere kullanılabilecek yakıt türü bakımından çok geniş bir yelpazesi vardır. Katı sıvı ve gaz gibi konvansiyonel yakıt kullanan türlerinin yanı sıra nükleer santrallerde de kojenerasyon amaçlı kullanımı kolaydır. Bu vesile ile kojenerasyon sistemlerinin kullanım alanı oldukça fazladır.
- Bilinen ve teknolojik olarak yerleşmiş bir enerji üretim yöntemidir. Bu sebeple kurulması ve işletilmesi diğer sistemlere göre gerek yasal açıdan gerekse teknik açıdan daha kolaydır.
- Yüksek sıcaklıkta ve basınçta buhar elde edildiği için hem ısıtma amaçlı kullanımlarda avantajlıdır hem de endüstriyel işletmeler için elverişlidir. Ayrıca ağır sanayi tesislerinde gerekli kızgın buhar ihtiyacını karşılamak için uygundur.

Karşı basınçlı buhar türbinlerin dezavantajları:

- Elektrik üretimi bakımından değerlendirme yapıldığında; verim benzer sistemlere nazaran oldukça düşüktür (%20).
- Yüksek basınçlı ve kızgın buhar üretimi olduğu için işletme basıncı yüksek olan boylerlere ihtiyaç duyulur. Boylerin yanı sıra diğer ısı ekipmanlarda üretilen buharın özelliklerine göre seçilmelidir. Uygun seçim yapılmazsa sistemin ilk yatırım ve bakım maliyetleri artar ekonomik açıdan olumsuz yönde etkilenir.
- Buhar türbinlerinin devreye alma ve ilk çalıştırmadan sonra normal çalışma rejimine gelmesi uzun zaman almaktadır.
- Güç ihtiyacının düşük olduğu zamanlarda sistemin tam yükte çalıştırılması verimini ve üretilen gücün birim maliyetini oldukça olumsuz etkilemektedir. Değişken yüklerde çalışmaya elverişli olmayan sistemlerdir.

Kondensli türbinler: kondensli türbinlerde buharın enerjisinden maksimum düzeyde faydalanılarak genişletilir ve sonra kondensere gönderilir. Bu yüzden kondensli

türbinlerde elektriksel verim kondenssiz türbinlere göre daha fazladır ancak çıkan buharın termal özellikleri ve kalitesi daha zayıf olduğundan ve ısı amaçlarıyla kullanımı olamayacağı için toplam verimi daha düşüktür.

Buhar türbinlerinin yatırım ve işletme masrafları; kullanılacak olan buharın termodinamik özelliklerine, istenen güç oranlarına, konstrüksiyon şartlarına ve istenen devir sayısına göre değişiklik arz etmektedir. Çizelge 1.2’de görüldüğü gibi ortalama büyüklükteki buhar türbinlerinin toplam yatırım maliyeti birim enerji (kW) başına 400 dolar ile 1.500 dolar arasında değişmektedir.

Çizelge 1.2. Buhar türbinli sistemlerin maliyetleri (Anonymous 2003)

Toplam Yatırım Maliyeti (\$c/kWh)	İşletme ve Bakım Maliyetleri (\$c/kWh)	Çalıştırma Saatine Göre (\$c/kWh)	
		8000 saat/yıl	4000 saat/yıl
400 – 1,500	< 2,0	2.5 – 6.5	4.0 – 12.0

Buhar türbinleri genellikle en az 40 kW enerji ihtiyacı olan ve enerji tüketimi kısa zaman aralıklarında değişmeyen ticari işletmelerde tercih edilmektedir. Günümüze kadar kurulmuş ve işletilmiş olan Rankine çevrimlerinin geneline bakıldığında 1MW altındaki kapasitede sistemlerin uygun verimlerde çalışmadığı ve kârlı bir yatırım özelliği taşımadığı görülmüştür.

Buhar türbinlerinin toplam işletme ömrü 50 yılı aşmaktadır. İşletme bakım giderleri (O&M–operation and maintenance) genellikle \$ 0.1c/KWh’den daha düşüktür.

1.4.1.b. Gaz türbini

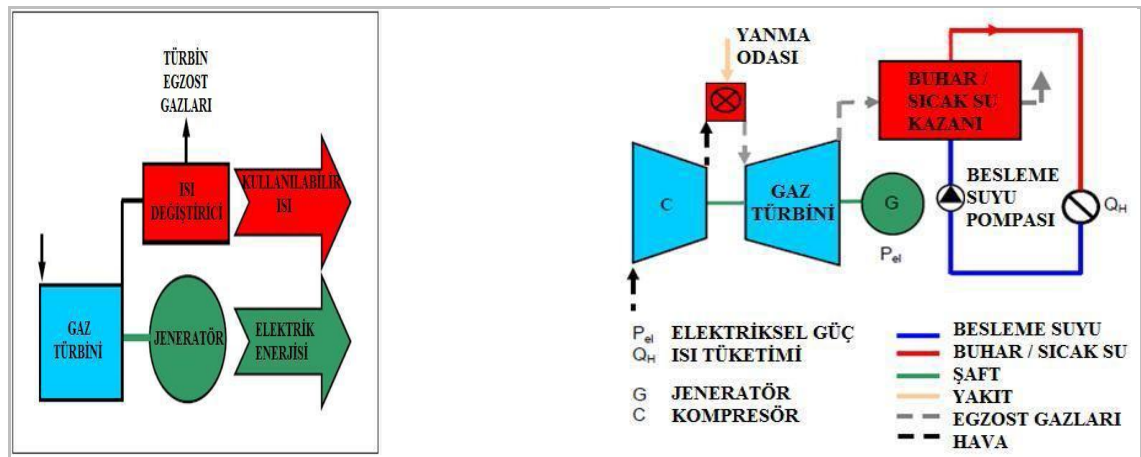
Gaz türbinleri son yıllarda büyük ölçekli kojenerasyon sistemlerinde genellikle 1-100 MWe elektriksel güç üretimi ile en çok kullanılan güç üreticiler olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Gaz türbin sistemlerinde hava, yanma odasına girmeden önce kompresörlerle yeterli basınca kadar sıkıştırılır ve burada sıcaklığı da artmış halde

yanma odasına gönderilerek yakılır. Yanma odasından oldukça yüksek sıcaklık ve basınçta çıkan yanmış gazlar türbine girer ve burada genişleyerek türbin milinde dönme hareketi meydana getirmek sureti ile jeneratör şaftını döndürürler. Burada üretilen gücün bir kısmı sistemin çalışması ve daha fazla verim elde edilmesi için hayati pozisyonda olan kompresörleri çalıştırmak için kullanılır. Günümüzde kullanılan modern gaz türbinlerinin elektriksel verimi, şaft milinde ortaya çıkan gücün bir kısmının çevrimi oluşturan diğer elemanlarına verilmesi halinde %28 ile %45 arasında değişmektedir. Gaz türbinlerinin egzoz gazları yaklaşık olarak 540°C’de çıkmaktadır ve genellikle ikinci bir alçak basınç jeneratöründe değerlendirilmek üzere veya buhar üretilmesi amacı ile kullanılabilir. Bu da elektrik verimini %45 ile %60’lara kadar çıkarabilmektedir. Gaz türbinleri titizlik gerektiren yüksek sıcaklık ve hız şartları altında çalışmaktadırlar. Bu yüzden türbin kanatlarındaki aşınmayı önlemek üzere türbine beslenen sıcak yanma gazlarında partikül bulunmamalı ve çalışma şartları altında korozyona neden olacak kirleticileri belirli sınırların üzerinde içermemelidir. Bu yüzden genellikle yüksek kalitedeki yakıtlar özellikle doğalgaz kullanılmaktadır. Motorin gibi destile edilmiş petrol ürünleri de kullanıma uygundur. Doğalgazda herhangi bir kesinti durumunda çalışmaya devam edebilmek için doğalgaz ve motorini birlikte kullanabilen sistemler mevcuttur. Endüstriyel tesislerde çok nadir de olsa daha ağır yakıtlar (kirleticilerden yeterli derecede yoksunsa) kullanılabilir. Nafta ve LPG’de kullanıma uygundur. Atıklardan üretilen biyogaz ve metan gazları kalori değerlerinin sabit ve içeriklerinin tutarlı olması kaydıyla, yanma odası çıkışında gerekli egzoz gazı çıkış sıcaklığını sağladığı takdirde kullanıma uygundur. Yakıt olarak biyogaz gibi düşük kalori değerli bir yakıt kullanıldığında elde edilen egzoz gazları doğalgaz kullanılarak elde edilen egzoz gazlarından farklı özelliklere sahiptirler. Türbinden güç çıkışını sağlayan türbin boyunca akan egzoz gazlarının kütleli debisidir. Türbinden egzoz edilen gazların sıcaklığı 450-550°C arasındadır. Bu yüksek sıcaklık gaz türbinlerini yüksek ısı yükleri için özellikle uygun kılmaktadır. Kullanılabilir ısı güç oranı 1.5/1–3/1 aralığında gaz türbininin karakteristiklerine bağlı olarak değişmektedir. Santral, yanma için oksijen sağlamak amacıyla gereken miktardan 2-3 kat daha fazla hava almaktadır. Fazla hava egzoz yolu boyunca türbin elemanlarının soğutulmasını sağladığı için çok önemlidir (Çakır 2007).

Egzoz gazları aşağıda belirtilen şekillerde kullanılabilir;

- Egzoz gazları yüksek sıcaklıkları nedeniyle kurutma proseslerinde kullanılmaktadır. Ürünün egzoz gazları ile direkt temasına izin verildiği durumlarda, egzoz gazları ara bir akışkana (buhar, sıcak su, ısı transfer akışkanları) gerek olmadan doğrudan ürün üzerinden geçirilerek kurutma işlemi yüksek verimle gerçekleştirilebilmektedir. Ancak egzoz gazlarının doğrudan kullanımı ürün kalitesini etkilediği için bu şekilde kullanım sadece doğal gaz ile çalışan gaz türbinleriyle sınırlıdır.
- Gaz türbini, alternatör ünitesi ve ısı geri kazanım kazanından oluşan bir sistemde, egzoz gazları, ısı geri kazanım kazanında, proseslerde veya alan ısıtmasında kullanılmak üzere orta veya düşük basınçta (8-18 bar) buhar üretmek amacıyla kullanılmaktadır.
- Yüksek sıcaklıkta sıcak su üretmek amacıyla kullanılmaktadır. İhtiyaç duyulan sıcaklığın 140°C 'yi geçmesi gerekmektedir.
- Buhar türbininde kullanılmak üzere ısı geri kazanım kazanında yüksek basınçta buhar üretmek için kullanılmaktadır.

Gaz türbini çevrimli kojenerasyon sistemlerinin şematik gösterimi Şekil 1.10'da verilmiştir.



Şekil 1.10. Gaz türbini çevrimli kojenerasyon sistemi prensip şeması (Sancar 2010)

Gaz türbin sistemlerinin avantajları:

- Kurulması, buhar türbinlerinden ve yüksek basınçlı buhar boylerlerinden daha kolaydır. Daha küçük alanlara daha az maliyetlerle kurulabilirler.
- Toplam maliyete bağlı olarak sistem kapasitesi büyüdükçe daha verimli sistemler olmaktadır.
- Yüksek sıcaklıkta buhar üretim imkânı vardır.

Gaz türbin sistemlerinin dezavantajları:

- Gaz türbin sistemlerine güvencesi olan ve istikrarlı özellikleri olan yakıtlar kullanılmalıdır. Bu yüzden ve de bu sistemlerin başka yakıtların kullanımına elverişli olmayışından dolayı; yakıtın eldesi, sürekliliği ve özelliklerinin kararlı olması önemlidir.
- Gaz türbinlerinde çok yüksek sıcaklıklarda çalışılmaktadır. Bu sebeple malzemelerin dayanımına bağlı olarak hem sistem iyileştirmesi zorlaşmaktadır hem de ilk yatırım maliyetleri düşürülememektedir.
- Kısmi yüklerde çalıştırılması durumunda verim düşmektedir.
- Yüksek rakımlarda ve çevre sıcaklığının arttığı dönemlerde türbin performansı önemlileranda düşmektedir.
- Küçük ölçekli sistemlerde diğer üretim yöntemlerine göre maliyetler yüksek verim ise düşüktür.

Gaz türbinli santrallerin toplam yatırım maliyeti üretilen her bir elektrik'in kWh başına 800-1800 dolar arasında değişmektedir. Farkın böyle büyük olmasının temel sebebi, gaz türbin boyutlarının ve kapasitelerinin birkaç kilowattan yüzlerce megawata kadar geniş bir yelpaze de olmasıdır. İşletme ve bakım maliyetleri de üretilen her bir elektrik'in kWh başına 0.3 ile 1.0 cent arasında değişmektedir. Gaz türbin sistemlerinde her dört bin saatlik çalışma periyodunda bir kanatçıkların temizliği ve genel bakım yapılmalıdır. Sıcak işlemlerin gerçekleştiği kısımların sürekli olarak kontrol altında tutulması ve her beş senede bir kere değiştirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden işletme ve bakım maliyetleri düzenli bakımların etkisi ile büyük aralıklarda değişim göstermektedir. Çizelge 1.3'de gaz türbinli kojenerasyon sistemlerinin maliyeti verilmektedir.

Çizelge 1.3. Gaz türbinli sistemlerin maliyetleri (Anonymous 2003)

Toplam Yatırım Maliyeti (\$c/kWh)		Toplam Yatırım Maliyeti (\$c/kWh)	Çalıştırma Saatine Göre (\$c/kWh)	
			8000 saat/yıl	4000 saat/yıl
Açık Çevrimli	800 – 1,800	0.3 – 1.0	4.0 – 5.5	5.5 – 8.5
CCTG/Kojenerasyon	800 – 1,200	0.3 – 1.0	4.0 – 4.5	5.5 – 6.5

1.4.1.c. Pistonlu motor

Kojenerasyon sistemlerinde kullanılan pistonlu motorlar otto ve diesel otomobil motorlarındakine benzer prensiple çalışan içten yanmalı motorlardır. Silindir hacimleri ve ebatları son derece büyüktür ve kapasitelerine göre değerlendirildiği zaman kilowatt başına en düşük maliyetli sistemlerdir. Elektriksel verimleri %45 gibi oldukça iyi değerlerdedir. Pistonlu motorlar; pik yükte elektrik üretimine ihtiyaç duyan işletmelerde veya orta büyüklükteki kojenerasyon sistemlerinde kullanılmak için uygundurlar. Pistonlu sistemler genellikle 5MW altındaki kapasitelerde tercih edilmektedir. Ürettikleri termal enerji genellikle egzost gazları ile motor soğutma sisteminden elde edilir. Tipik olarak 100°C dolaylarında sıcak su üretilmektedir. Egzost gazları her zaman yüksek sıcaklıktadırlar (yaklaşık 400°C ye kadar)

Kojenerasyon sistemlerinde tercih edilen pistonlu motorlar araba motorlarındaki gibi buji ateşlemeli (otto çevrimi) ve sıkıştırma ateşlemeli (dizel çevrimi) olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Sıkıştırma ateşlemeli motorlar: Arabalarda kullanılan bildiğimiz dizel motorları ile aynı prensip üzerine kurulmuştur. Günümüz dizel çevrimli motorlarında olduğu gibi genellikle turboşarz ve intercooler sistemleri bulunmaktadır. Dizel çevrimli kojenerasyon motorlarının kapasiteleri 75 KW ile 60 MW arasında, elektriksel verimi ise %35 ile 45 arasında değişmektedir (Çakır 2007).

Bu motorlarda sıkıştırma stroğunda piston alınan havayı sıkıştırır ve basıncını artırır. Basıncın artmasıyla birlikte havanın sıcaklığı artacağı için sıkıştırma işlemi havanın sıcaklığı yakıtın tutuşma sıcaklığına erişinceye kadar devam eder. Daha sonra çok yüksek basınçlı yakıt enjektörleri yakıtı atomize olmuş halde sıkıştırılmış havanın içine püskürtürler ve yüksek hızlı yanma neticesinde güç stroğu gerçekleştirilmiş olur. Doğalgaz veya buharlaştırılmış benzinin tutuşma sıcaklıkları yüksek olduğu için bu yöntemle yakılmaları oldukça zordur. Bu nedenle doğalgaz ve benzin motorlarında ateşleme bujileri kullanılarak yanma olayı sağlanır ve güç elde edilir. Doğal emişli pistonlu motorlarda alınan hava doğrudan silindirlere gönderilmektedir. Bundan dolayı alınan havanın miktarına bağlı olarak silindirlere daha az yakıt gönderilir. Bu durum yanmayı diğer sistemlere göre olumsuz etkiler ve sonuç olarak üretilecek güç oranı da azalır. Süper şarj sisteminde ise hava dışarıdan güç harcanarak alındığı için aynı hacme daha fazla hava alınmış olur ve alınan havanın miktarına bağlı olarak daha fazla yakıt gönderilerek daha etkin güç üretimi yapılmış olur. Modern motorlarda ise süper şarjın yerini turbo şarj veya kompresör sistemleri almıştır. Egzoz gazları salınmadan önce oldukça yüksek hızlı olan genleşme türbininden geçirilir ve burada meydana gelen dönme hareketi giriş havasının basıncını iki veya üç katına çıkarmak ve daha iyi dolum yapmak amacıyla kullanılan kompresöre iletilerek işlem gerçekleştirilir. Kullanılan genişleme türbinleri genellikle 200 000 devir/dakika'da çalışabilen geliştirilmiş türbinlerdir. Daha sonra silindir içine sıkıştırılmış olarak alınan ve sıcaklığı artmış olan hava soğutulmaktadır. Sıkıştırılmış havanın ısı enerjisinin azaltılmasının amacı pistonlara emme strokunda silindir içine daha fazla oksijen alınmasını sağlamaktır. Bunun sonucu olarak da gönderilecek yakıt oranı alınan oksijen miktarına bağlı olarak artırılır ve birim zaman ve strokda daha fazla güç elde edilir.

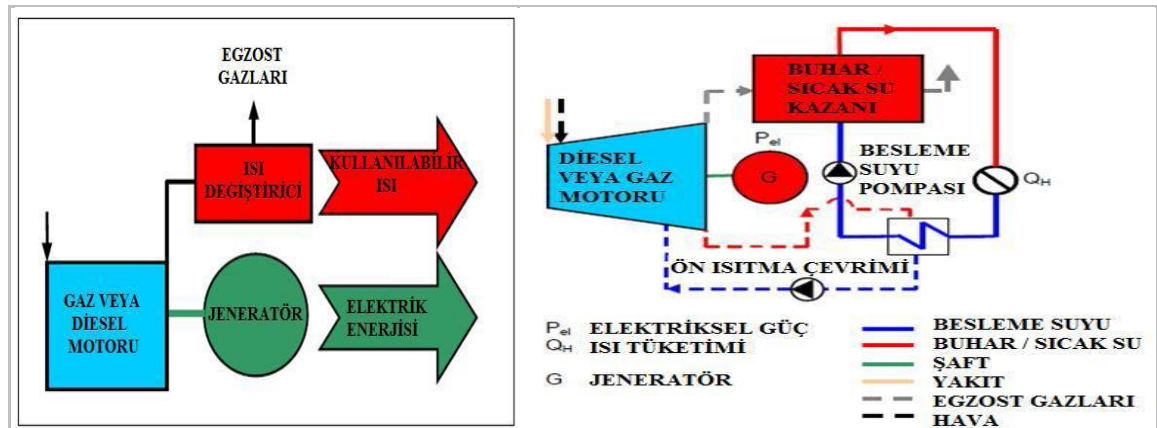
Buji ateşlemeli motorlar: sıkıştırma işlemi ateşleme işlemine hazırlık ve daha iyi yanma elde etmek amacıyla kullanılırken, ateşleme için buji sistemi kullanılır. Buji ateşlemeli motorların kapasite aralığı sıkıştırma ateşlemeli motorlarınkine göre daha azdır. Kıvılcım ateşlemeli motorların kapasite aralığı 10 kW ile 15 MW arasında değişmektedir. Kıvılcım ateşlemeli motorların elektriksel verimi %25 ile 43 arasında değişmektedir.

Kojenerasyon amaçlı kullanılan buji ateşlemeli motorlarda benzin kullanmak ekonomiklikten son derece uzaktır. Bu sistemlerde kullanılan en yaygın yakıt türü doğalgazdır. Bunun yanında biyogaz, çöp gazı ya da hava gazı gibi diğer yakıtlarda kullanılabilir.

Pistonlu motorlar tarafından üretilen termal enerjinin en genel kullanım alanları aşağıda sıralanmaktadır;

- Egzoz gazlarının ısısı kullanılarak 15 bara kadar buhar üretimi ve ayrıca motorun soğutma sisteminden 85-90°C’de sıcak su üretimi.
- Egzoz gazlarının ve soğutma sistemi suyunun ısılarını birlikte kullanılarak 100 °C de sıcak su üretimi.
- Egzoz gazlarının kurutma ve CO₂ üretimi gibi proseslerde, arada ısı değiştirici ve ara ısı transfer akışkanı olmadan doğrudan kullanılabilir.
- Uygun ısı transfer elemanları kullanılarak atık ısının tümü sıcak hava üretimi için kullanılabilir.

Pistonlu motorlar fazla hareketli parçaları oldukları için yalnızca dönme hareketi yapan türbinlere göre daha fazla aşınan parçaya sahiptirler ve bu nedenle türbinlere göre çok daha kısa aralıklarla bakıma ihtiyaç duyarlar.



Şekil 1.11. Diesel ve gaz motorlu kojenerasyon sistemi

Motorlu kojenerasyon sistemlerinin avantajları:

- Bütün olarak kojenerasyon sisteminin ilk yatırım maliyeti düşüktür.
- Değişken yüklerde çalıştırılması gereğinde verim diğer sistemler kadar olumsuz etkilenmez. Geniş uygulanabilme yelpazesi vardır.
- Devreye alma ilk çalıştırma zamanı 10–15 saniye gibi çok kısa bir süredir. Bu yüzden yedek güç sistemi olarak neredeyse her yerde motorlu sistemler tercih edilmektedir.
- Güvenilirliği diğer sistemlere nazaran çok fazladır.

Motorlu kojenerasyon sistemlerinin dezavantajları:

- Titreşim çok fazla olduğu için destek yapılar ve donanımlar gerektirmektedir. Titreşimin yanı sıra gürültü oranı da çok fazla olduğu için akustik sistemlere ve sesyalıtımı da gerekmektedir.
- Çok sayıda hareketli parçaların ve donanımlarının olması bu sistemlere yağlama, soğutma, bakım ve işletme maliyetleri bakımından ciddi bir dezavantaj getirmektedir. İşletme ve bakım maliyetlerinin gaz türbinlerinde \$ 4,5 MWh iken bu sistemlerde \$ 10 MWh olması bu dezavantajın önemini göstermek için yeterlidir.
- Atık ısının sürekli olarak değerlendirilmesi zordur. Yaz aylarında toplam verim atık ısının kullanılamamasına bağlı olarak düşmektedir.
- Bakım zamanlarının çok sık olması dezavantajdır. Motorlu sistemlerde en az 600 saatte en fazla 1000 saatte bir bakım yapılmalıdır.

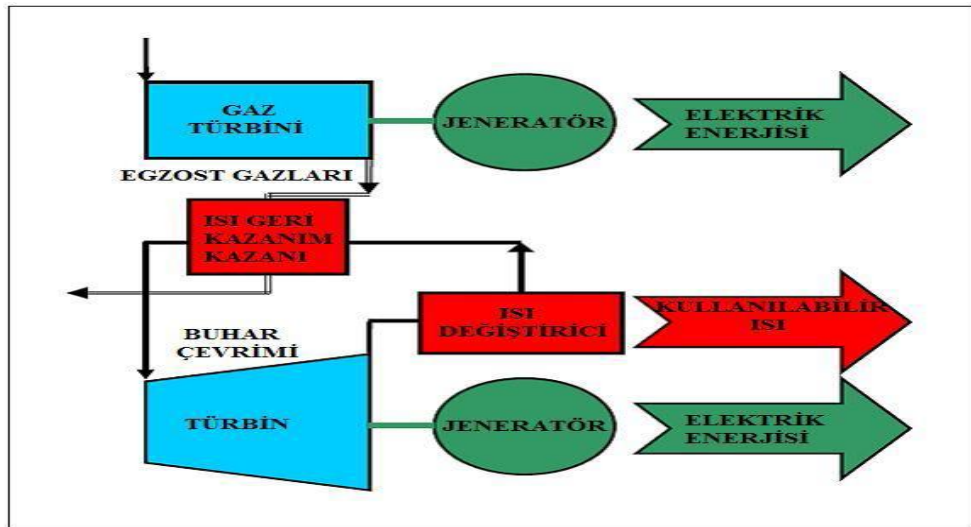
Motorlu kojenerasyon sistemleri genel olarak ilk yatırım maliyetlerinin düşük olduğu, işletme bakım servislerinin yaygın ve kısmi yüklemelerdeki veriminin de diğer sistemlere nazaran iyi olduğu görülmektedir. En ekonomik kojenerasyon sistemlerinin başında 1kW dan 5 MW a kadar olan küçük ve orta ölçekte kurulmuş motorlu sistemler gelmektedir. Çizelge 1.4’de görüldüğü gibi motorlu kojenerasyon sistemlerinin ilk yatırım maliyetleri \$ 900–\$ 2,500 arasında değişmektedir.

Çizelge 1.4. Motorlu sistemlerin maliyetleri (Anonymous 2003)

Toplam Yatırım Maliyeti (Sc/kWh)	İşletme ve Bakım Maliyetleri (Sc/kWh)	Çalıştırma Saatine Göre (Sc/kWh)	
		8000 saat/yıl	4000 saat/yıl
900 - 2500	0.5 - 2	4.5 - 5.5	6 - 8

1.4.1.d. Kombine çevrim

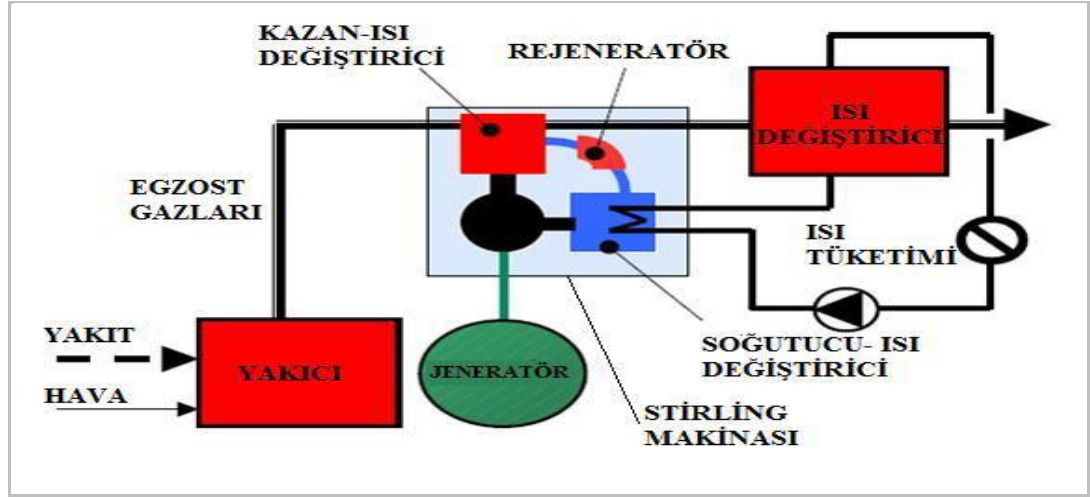
Güç üretimleri genellikle 3MWe'den büyük olan bazı büyük sistemlerde gaz türbini ve buhar türbini birlikte kullanılmaktadır. Bu sistemlerde gaz türbininden egzoz edilen yüksek sıcaklıktaki gazlar atık ısı kazanına gönderilir ve burada buhar türbininde kullanılmak üzere buhar üretmekte kullanılırlar. Şekil 1.12'de şematik resmi verilen gaz türbini ve buhar türbininin birlikte çalıştığı bu sistem kombine çevrim olarak adlandırılmaktadır. Kombine çevrimlerin en yaygın kullanımı gaz türbinleriyle ancak diesel motorlu kombine çevrimler de dizayn edilebilmektedir. Kombine çevrim gaz türbini sistemlerinde türbinden ara buhar alma yoluyla veya türbin egzozundan elde edilen buhar proseslerde veya diğer ısıtma ihtiyaçlarında kullanılabilir.

**Şekil 1.12.** Buhar ve gaz türbini kombine çevrimli kojenerasyon sistemi prensip şeması

1.4.1.e. Stirling motorları

Stirling motorları dıştan yanmalı motorlardır ve bu yüzden yakıtın motor içinde yandığı konvansiyonel sistemlerden tamamen farklıdır. Stirling motorlarına ısı dış bir kaynaktan transfer edilir ve bu da motor içindeki akışkanın (helyum) genişlemesine ve böylelikle iki pistondan birinin silindir içerisinde hareket etmesine neden olur. Bu pistonu iş pistonu denilmektedir. İkinci piston ise yer değiştirici piston olarak bilinir ve gazı iş pistonu tarafından yeniden sıkıştırılacağı soğuk bölgeye transfer eder. Yer değiştirici piston daha sonra sıkıştırılmış gaz veya havayı sıcak bölgeye transfer eder ve çevrim böylece tekrar eder. Stirling motoru konvansiyonel motorlara göre daha az hareket eden parçaya sahiptir ve hiçbir vana yakıt enjektörü, ateşleme sistemi içermez. Bu nedenlerle ve ayrıca diğer motorlarda ki kesintili yanma çevrimi yerine stirling motorunun sürekli çalışması sebebiyle diğer makinalara göre daha sessizdir. Stirling motorları az bakım gerektirir. Emisyonlarında partikül, nitrojen oksit, ve yanmamış hidrokarbon miktarları düşüktür. Bu makinelerin verimleri içten yanmalı motorlar veya gaz türbinlerine göre daha iyidir. Bu motor teknolojisi 60 yıllık bir geçmişe sahiptir ancak yeni olan bunun mikro-kojenerasyon kazanlarında kullanılmasıdır. Bu tip kazanlarda kapasitesi 0.2-0.4 kWe arasında küçük motorlara ihtiyaç vardır. Bu uygulamalarda stirling motorları çok iyi bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Gaz türbinleri ve gaz motorları bu ölçekte uygun değildirler, günümüzde en küçük otto motor 3kWe gücündedir. Şekil 1.13’de şematik resmi verilen stirling motoru kullanılan kojenerasyon sistemlerinde egzoz gazlarından ve motorun soğuk kısmından gelen soğutma suyundan eşanjörlerde ısı geri kazanımı yoluyla elde edilen ısı kullanım suyu ısıtması, alan ısıtması veya soğutması gibi ısıl ihtiyaçları karşılamak üzere kullanılmaktadır.

Stirling motorlu kojenerasyonda hareketli parçalarının az oluşu, dıştan yanmada temiz egzoz gazlarının oluşması, motordan elde edilen elektriksel güç çıkışının motorun sıcak tarafının sıcaklığının değiştirilerek ayarlanabilmesi stirling motorlarının avantajları olarak karşımıza çıkmaktadır. Çok küçük ölçeklerdeki stirling motorlarında bile %30’dan fazla elektriksel verime ulaşılmıştır.



Şekil 1.13. Stirling motorlu kojenerasyon sistemi

Stirling motorlarının genel avantajları:

- Güç ısı oranının düşük olması Stirling motorlarını özellikle evsel kullanım için cazip hale getirmektedir.
- Hareketli parçaların sayısının az olması hem titreşimi azaltmakta hem de motorda kullanılan komponentlerin de az sayıda ve basit yapıda olmasını sağlamaktadır.
- Yanma olayının sürekli olması sonucu darbeli çalışan motorlara göre daha sessiz çalışma şartları getirmektedir.
- Dıştan yanmalı olduğu için yakıt seçenekleri bakımından çok yönlü sistemlerdir. Bu durum aynı zamanda anlık olarak ısı kaynağının değiştirilebilmesini mümkün kılmaktadır. Örneğin gündüzleri güneş enerjisinden faydalanarak çalışan bir Stirling motoru geceleri de farklı bir kaynaktan beslenerek çalışabilir. Ayrıca işletmelerde ve tarım bölgelerinde sezona göre ortaya çıkan atık maddeler değerlendirilebilir.
- Elektrik üretimi amaçlı kullanımlarda ısı transferinden faydalanılarak üretim oranları çok kolay değiştirilebilmektedir.

Stirling motorlarının genel dezavantajları:

- Maliyeti çok fazla ama güvenilirliği azdır.

- Güç verimi çok düşüktür.

Stirling motorlarının ekonomikliği şu an için seri üretim yapılmasına ve kullanımının yaygınlaşmasına bağlıdır. Kapital maliyeti 2000–5000 \$/KWh arasında değişmektedir. Çizelge 1.5’de Stirling motorlu kojenerasyon sistemlerinin maliyeti verilmiştir.

Çizelge 1.5. Stirling motorlu sistemlerin maliyetleri (Anonymous 2003)

Toplam Yatırım Maliyeti (\$/kWh)	İşletme ve Bakım Maliyetleri (\$/kWh)	Çalıştırma Saatine Göre (\$/kWh)		
		8000 saat/yıl	4000 saat/yıl	4000 saat/yıl
1300 – 2500	0.5 - 1,6	5,0 - 7,0	7,0 - 11,0	14,5 - 34,0

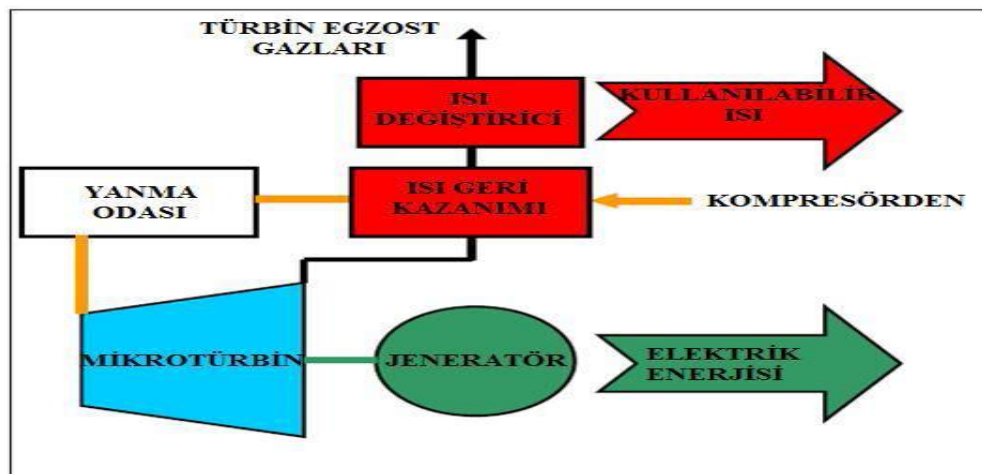
Stirling motorları günümüzde güç üreten sistemlerle rekabet edecek seviyede değildir. İşletme ve bakım maliyetleri de hala tam olarak belirlenebilmiş değildir. Ancak az sayıdaki mevcut stirling motor sistemlerine bakıldığında bu miktarın çok olmayacağı; \$ 0.2c-\$3.5c/kWh arasında olacağı tahmin edilmektedir. Stirling motorlarının maliyetinin düşürülmesi için yapılan çalışmalar özellikle tasarım ve konstrüksiyon açısından geliştirmelerin hızla devam edeceğini göstermektedir.

1.4.1.f. Mikro türbinler

Mikro türbinler 25–500 kW arasında güç üretebilen küçük ve düşük hızlı jeneratörlerdir. Şekil 1.14’de şematik resmi verilen mikro türbinler uçaklarda ve küçük jet motorlarında kullanılan yardımcı güç ünitelerinden ve araç motorlarında kullanılan turbo şarj sistemlerinden esinlenerek tasarlanmış sistemlerdir. Türbinle bağlantılı basit bir mil, kompresör ve jeneratörden oluşmaktadır.

Gaz türbinleri kısmında açıklandığı üzere 1 MWe’den düşük güçlerdeki küçük sistemler şimdiye kadar ekonomik olmamaktaydı, ancak bu durum değişmeye başlamıştır. Günümüzde üreticiler çok küçük sistemler geliştirmeye başlamışlardır ve artık 25 kWe gibi küçük güçte mikrotürbinler üretilmektedir. Mikrotürbinler hepsi aynı tek shaft

üzerinde bulunan kompresör, türbin, jeneratör ve bunlara ek olarak üretilen elektriği şebekeye vermek için güç elektroniği kısmından oluşan küçük, yüksek hızlı güç üretim santralleridir. Mikrotürbinler sadece bir hareketli parçaya sahiptirler, hava yatakları kullandıklarından yağlamaya ihtiyaç duymazlar. Esasen yakıt olarak doğal gaz kullanırlar ancak diesel, benzin veya diğer benzer yüksek enerjili fosil yakıtlarla da çalışabilirler. Biyogaz kullanımı hakkında çalışmalar halen devam etmektedir. Mikrotürbinler konvansiyonel pistonlu motorlara göre daha küçüktürler, yatırım ve bakım maliyetleri daha düşüktür ve bununla birlikte düşük NO_x emisyonu (10-25 ppm) oluşturmaktadırlar.



Şekil 1.14. Mikrotürbinli kojenerasyon prensip şeması

Mikro türbinlerin avantajları:

- Mikro türbin sistemleri ticari ve konutsal yapılarda yedek güç ünitesi olarak ya da maksimum güce gerek duyulduğunda yardımcı güç ünitesi olarak kullanılabilirler.
- Yerel elektrik dağıtım ağına gerek duymadan çalışabilen sistemlerdir. Bu sayede ilk çalıştırma da diğer sistemler gibi elektrik gerekmez.
- Kojenerasyon sistemlerinde kullanıldığında verim %85 gibi çok yüksek değerdedir.

Mikro türbinlerin dezavantajları:

- Elektriksel verimi %20–30 arasında oldukça düşüktür.
- Verimlilik dış ortam şartlarına çok duyarlıdır. Bu yüzden değişkendir.

Mikro türbinli kojenerasyon sistemleri için maliyetler Çizelge 1.6’da verilmiştir.

Çizelge 1.6. Mikro türbinli kojenerasyon sistemlerin maliyetleri (Anonymous 2003)

Toplam Yatırım Maliyeti (\$c/kWh)	İşletme ve Bakım Maliyetleri (\$c/kWh)	Çalıştırma Saatine Göre (\$c/kWh)	
		8000 saat/yıl	4000 saat/yıl
1300 – 2500	0.5 – 1,6	5,0 – 7,0	7,0 – 11,0

1.4.1.g. Yakıt pilleri

Konvansiyonel sistemler yakıtı öncelikle ısıya sonra şaft gücü ve daha sonra elektriğe çeviren sistemlerdir. Yakıt pilleri ise gücü pillerdeki gibi elektrokimyasal olarak üretirler. Ancak depo edilmiş kimyasalı kullanan pillerden farklı olarak yakıt pilleri yakıt olarak hidrojenin pilin negatif (katod) kutbuna ve oksijen bulunduran havanın da pilin pozitif kutbuna gelmesiyle güç üretmeye başlarlar. Yakıt olarak kullanılan hidrojen çeşitli kaynaklardan elde edilebilir ancak en ekonomik yol doğalgazın buharla işlenmesidir. Bu kimyasal proses sırasında hem yakıt hem de doğalgazda bulunan hidrojen ayrıştırılarak yakıt elde edilir. Yakıt pilleri, pil içindeki elektrokimyasal reaksiyonun başlamasını sağlayan ortam adına göre isimlendirilmektedirler. Yakıt pili tipleri ve bu tiplerin önemli özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

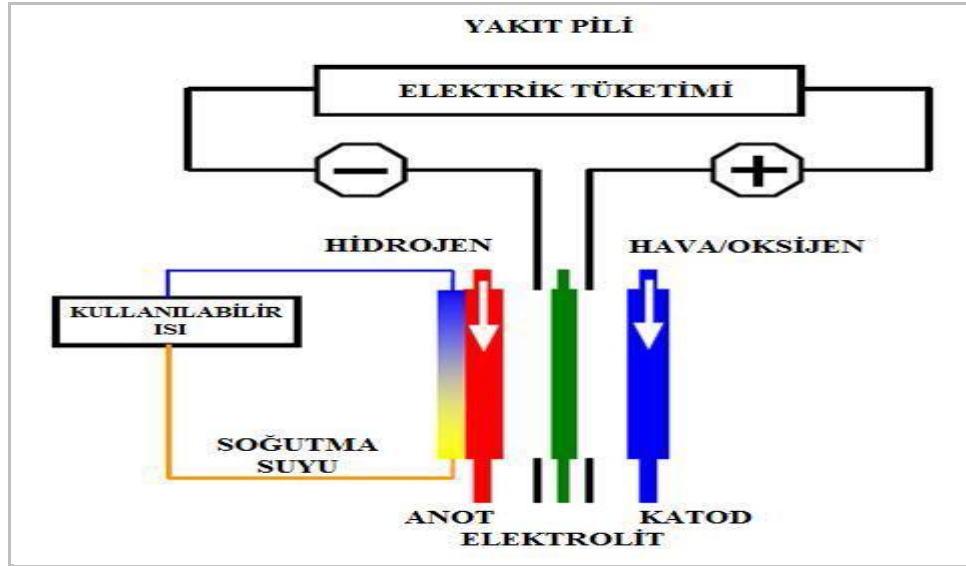
Fosforik asit elektrolit yakıt pilleri (PAFC) günümüze kadar en çok kullanılan yakıt pilleridir. PAFC ABD, Avrupa ve Japonya’da kombine ısı ve güç üretimi amacıyla 200’den fazla yerde kullanılmaktadır. PAFC’ler ilk pratik uygulamadır. Bunun sebebi PAFC’lerin diğer sulu asitlerden farklı olarak suyun kaynama sıcaklığından yüksek,

genellikle 200°C sıcaklıkta çalışabilmeleridir. Böylelikle PAFC'ler, metanı yakıt olarak kullanabilmek üzere hidrojen zengin gazı çevirebilmek amacıyla yakıt pilinin atık ısısını doğrudan kullanabilir. PAFC'ler 200kWe gücünde birbirleriyle kolaylıkla kombine edilebilen modüller halinde üretilmektedirler. Atık ısı alan ısıtması veya sıcak su amaçlı olarak kullanılabilir ancak diğer kojenerasyon uygulamalarında kullanılacak kadar kaliteli değildir. Molten karbonat yakıt pilleri (MCFC) yüksek sıcaklıklarda çalışabilmekte ve tahmini verimleri alt ısı değerinin %55'i kadar olmaktadır. PAFC'lere göre daha verimlidirler. Karbonat elektrolit oda sıcaklığında katı fakat çalışma şartlarında 650°C-800°C arası sıvı olmaktadır. MCFC'nin yüksek egzoz gazı sıcaklığı, buhar türbini veya gaz türbini kombine çevrimi vasıtasıyla ek elektrik üretiminde kullanılabilir. Molten karbonat yakıt pilleri 1-20 MW arası yedek güç uygulamalarında ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaya uygundur. (Anonymous 2003)

Katı oksit yakıt pilleri (SOFC) yakıt pillerinin en yeni tipidir, ancak hala değişik konfigürasyonlar için laboratuvar testi aşamasındadır. MCFC' de olduğu gibi SOFC'de de üretilen yüksek derecedeki atık ısı buhar türbininde kullanılmak üzere buhar üretiminde ve birçok diğer ısı ihtiyacı için kullanılabilir. Gaz türbini veya mikrotürbinli hibrid sistemler elektrik verimini %60'a çıkarmaktadır.

Proton değişim membranlı yakıt pilleri (PEM) göreceli olarak daha düşük sıcaklıklarda (80°C) çalışmaktadırlar. Çünkü proton değişim membranı yüksek sıcaklıklarda erimektedir. Bu yakıt pilinin düşük sıcaklıktaki ısısı geleneksel kojenerasyon için uygun değildir, fakat çabuk devreye girebilmesini sağlar.

Şekil 1.15'de şematik resmi verilen yakıt pilinin tipi proses sırasında açığa çıkan ısı miktarını ve kojenerasyona uygun olup olmadığını belirler. Düşük sıcaklıktaki yakıt pilleri düşük basınçlı buhar ve sıcak su kojenerasyon sistemleri için uygun termal ürün üretirler. Yüksek sıcaklıktaki yakıt pilleri ise kombine çevrim veya diğer kojenerasyon sistemlerinde kullanılmak üzere yüksek basınçlı buhar üretirler.



Şekil 1.15. Yakıt pili prensip şeması

Yakıt pillerinin avantajları:

- Yakıt pillerinde basit sistemlerin güç üretimi bakımından verimi azdır. Ancak günümüzde çok gelişmiş olan teknolojisi ve uygulamada olan çok farklı yöntemler elektriksel verimi yeterince artırmıştır.
- Yakıt pillerinde üretilen ısı miktarı genellikle termal uygulamalar için kullanıma uygun niteliktedir.
- Emisyon değerleri çok düşüktür ve en sessiz güç üretim yöntemidir.

Yakıt pillerinin dezavantajları:

- PAFC (Phosphoric Acid Fuelled Cell) haricindeki sistemler tam olarak kullanıma hazır değildir.
- Gelişimi halen devam etmektedir. Çoğu alanda oturmamış bir teknolojisi vardır.

Bu sistemlerin toplam yatırım maliyetleri yaklaşık olarak üretilen elektrik enerjisinin kWh başına 3,500-5000 dolar arasında değişmektedir. İşletme bakım masrafları ise

\$0,5c-\$ 5c /KW arasında değişmektedir. Çizelge 1.7’de yakıt pilli sistemlerinin maliyetleri verilmiştir.

Çizelge 1.7. Yakıt pilli sistemlerin maliyetleri

Toplam Yatırım Maliyeti (\$c/kWh)	İşletme ve Bakım Maliyetleri (\$c/kWh)	Çalıştırma Saatine Göre (\$c/kWh)	
		8000 saat/yıl	4000 saat/yıl
3500 - 5000	0.5 - 5	9 - 11.5	14.5 - 19.5

1.4.2. Isı geri kazanım ünitesi

Kojenerasyon sistemlerinde kullanılan birincil ısı geri kazanım ekipmanları çeşitli tiplerdeki buhar ve sıcak su üretim tesislerini içermektedir. Ancak bunlara ek olarak absorpsiyonlu soğutma sistemleri de ısı geri kazanım ekipmanı olarak kullanılabilir. Absorpsiyonlu soğutma sistemleri doğrudan egzoz gazlarından ısı geri kazanımı yaparak birincil ısı geri kazanım ünitesi olarak veya ısı geri kazanım kazanında üretilen buhar veya sıcak suyu kullanarak ikincil ısı geri kazanım sistemi olarak çalışabilen tipleri mevcuttur. Isı geri kazanım sistemleri için çeşitli konfigürasyonlar kullanılmaktadır. Isı geri kazanım kazanları üç kategoriye ayrılmaktadır,

- Ateşlemesiz
- Kısmi ateşlemeli
- Tamamen ateşlemeli

Ateşlemesiz ısı geri kazanım kazanları aslında konveksiyonlu ısı değiştiricilerdir. Kısmi ateşlemeli ısı geri kazanım kazanları kanal tipi yakıcı içermektedirler. Bu yakıcı sistemde genellikle doğal gaz kullanılmaktadır ve ısı geri kazanım kazanına doğru akan egzoz gazlarının sıcaklıkları yakıcı kısmında yükseltilerek ısı geri kazanım kazanına gönderilirler. Tamamen ateşlemeli ısı geri kazanım sistemleri ise basitçe egzoz gazlarını ön ısıtılmış hava olarak kullanan kazanlardır. Bu ısı geri kazanım kazanlarının çoğunda

egzozgazları kazan boyunca yukarı doğru akar ve üst noktadan kazanı terk ederek atmosfere atılır.

Atmosfere atılan egzoz gazları önemli miktarda ısı içermektedir. Ancak bu ısının tamamı geri kazanılamaz. Bunu engelleyen birkaç faktör vardır. Bunlar;

- Isı transferinin verimli bir şekilde gerçekleşebilmesi için egzoz gazlarının sıcaklığı ısıtılacak olan suyun sıcaklığından yüksek olmalıdır. Genellikle minimum pratik sıcaklık farkı 30°C'dir.
- Egzoz gazları yoğunluk farkıyla yaptıkları yükselme hareketini ortadan kaldıracak sıcaklıklara soğutulmamalıdır.
- Egzoz gazları asit kondensasyonu olabilecek sıcaklıklara soğutulmamalıdır. Bu risk özellikle sülfür içeren yağ yakıtların yakılmasında önemlidir. Belirli sıcaklığın altında yakıttaki sülfür sülfürik aside yoğunlaşır.
- Egzoz gazlarındaki su buharının gizli ısısı ancak egzoz gaz sıcaklığı 100°C'nin altına düşürülerek geri kazanılabilir. Bu sıcaklığa düşüldüğünde su buharı yoğunlaşırken ortama gizli ısını verir. Bu şekilde dizayn edilen kazanlar yüksek verimli olmaktadır. Ancak yukarıdaki üç maddedeki sınırlayıcı etkiler burada da geçerlidir. Isı geri kazanım kazanlarının tipik özelliği konvansiyonel yakıt yakma sistemlerine göre daha büyük olmalarıdır. Bu durumun başlıca iki sebebi vardır;
- Düşük egzoz sıcaklıkları kazanda büyük ısı transfer alanı gerektirir.
- Egzoz gazlarının akışında aşırı direnç türbin veya motorun çalışmasına kötü etkide bulunabilir.

Açık çevrimde ısı geri kazanımını arttırmak için genellikle kullanılan yöntem kazanı terkeden egzoz gaz akımına ekonomayzer olarak bir ısı değiştirici eklemektir. Göreceli olarak soğuk olan kazan besleme suyu ekonomayzer içinde tüpler boyunca akarken egzoz gazlarında bulunan ısıyı geri kazanır ve egzoz gazları 120°C veya daha altına soğur. Ekonomayzerlar buhar çevrimli kojenerasyonda da yüksek basınçlı buhar kazanlarıyla kullanılırlar. Yaklaşık 60°C sıcaklığında suya ihtiyaç olduğunda ekonomayzer olarak kondensasyonlu ekonomayzer kullanılır su istenilen sıcaklığa

ısıtılırken, egzoz gazları da 80°C civarına soğur. Kondensasyonlu ekonomayzerlar ancak doğal gaz yakan sistemlerde kullanılırlar. Çünkü doğalgazda sülfür yoktur dolayısıyla asit korozyonu riski minimize edilmiş olur.

1.4.3. Jeneratör ve elektrik ekipmanları

Kojenerasyon sistemindeki elektrik ekipmanları; jeneratörler, trafolar, devre kesiciler, iletim hatları, sayaçlar ve kontrol sistemlerini içermektedir. Ancak elektrik üretimini destekleyen bu ekipmanların yanında, şebekeye paralel bağlı yedek acil durum gücü olarak çalıştırılan veya şebekeye elektrik satan kojenerasyon sistemleri, şebekeye bağlantı ekipmanlarına da ihtiyaç duyarlar.

Jeneratörler güç üreticinin dönen shaftındaki mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler. Bu proses için temel prensip “Faraday Etkisi” olarak adlandırılır. Bu prensibe göre elektriksel olarak iletken bir malzeme örneğin kablo manyetik alan boyunca hareket ettirilirse kablo üzerinde elektriksel akım oluşur. Jeneratörler için önemli bir nokta çalışmak için manyetik alana ihtiyaç duymalarıdır. Bu manyetik alanın enerji kaynağı jeneratörleri iki ana tipe ayırır.

Eğer bir jeneratör bir elektrik kaynağına bağlıysa ve çalışmak için bu kaynağı manyetik alan olarak kullanıyorsa indüksiyon jeneratörü veya asenkron jeneratör olarak adlandırılır. Bu durumda jeneratör senkron hızların üzerinde çalışırlar. Ancak bu tipteki jeneratörler dış akım (genellikle elektrik şebekesinden gelen akım) yoksa çalışamazlar. Bu nedenle asenkron jeneratörler yedek jeneratör olarak kullanılamazlar. Ama bununla birlikte şebeke bağlantı ara yüzleri basittir. Diğer tipte ise manyetik alan küçük bir alternatör kullanılarak jeneratörün içinde oluşturulur. Bu tip jeneratörler senkron jeneratörler olarak adlandırılırlar ve senkron hızlarda çalışırlar. Senkron jeneratörler diğer santrallerden ve şebeke bağlantısından ayrı olarak çalışabilirler. Bu tip jeneratörler şebekede kesinti olduğunda da enerji üretmeye devam edebilirler. Bu nedenle yedek jeneratör gibi davranabilirler. Senkron jeneratörler 200kWe’nin altındaki güç üretimlerinde asenkron jeneratörlere göre çok daha pahalıdır. Bunun nedeni ek kontrol,

başlatma ve bağlantı ara yüzü ekipmanları gerektirmesidir. Genellikle 200kWe gücün üzerinde senkron jeneratörlerin asenkron jeneratörlere göre maliyet avantajı ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte küçük yüklerdeki kojenerasyon sistemlerinde dahi genel eğilim senkron jeneratör kullanmak yönündedir.

1.4.4. Kontrol sistemi

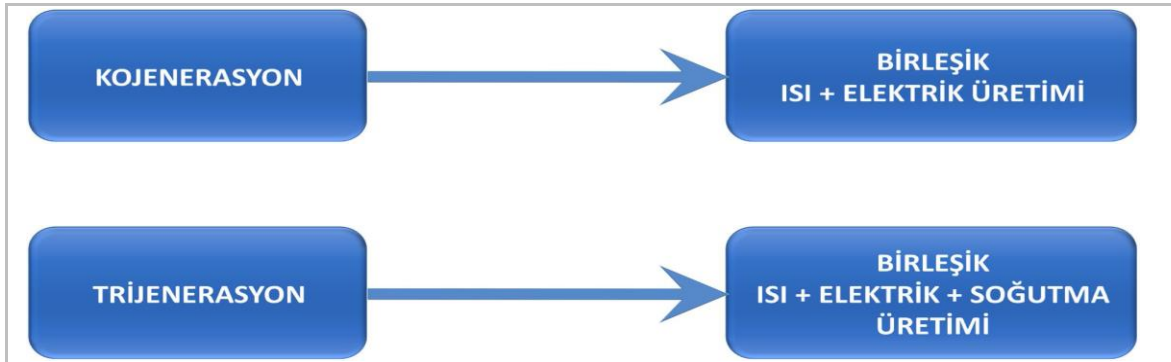
Kojenerasyon santralının devreye giriş çıkışları, santralin kontrol sisteminde belirlenmiş çalışma rejimine göre ayarlanmaktadır. Kojenerasyon santralleri için üç temel çalışma rejimi kullanılmaktadır. Bunlar;

- Santral ana elektrik ve ısı yükünü karşılamak amacıyla çalıştırılır. Eğer üretilen elektrik veya ısı, ihtiyaçları karşılamada yetersiz kalırsa sistem ek olarak elektrik ihtiyaçları için şebeke elektriğiyle, ısı ihtiyaçları için de yedek kazan veya ek yakma sistemleriyle desteklenir.
- Santral dışarıya satmak üzere saha ihtiyacının üzerinde elektrik üretmek amacıyla çalıştırılırken ısı saha ihtiyacını karşılamak için kullanılır.
- Santral sadece saha elektrik ihtiyacı için veya dışarıya da elektrik satmak amacıyla çalıştırılır. Üretilen ısı ise saha ihtiyaçlarını karşılamak üzere kullanılır fazla miktarı saha dışındaki tüketicilere satılır.

Kullanım alanı için optimum çalışma rejimi belirlenirken aşağıdakiler göz önüne alınmalıdır;

- Elektrik alım satım tarifeleri
- Yakıt maliyetleri
- Isı ihtiyacı olan müşterilerin belirlenmesi
- Yedek ısı merkezinin verimi
- Bakım maliyetleri
- Diğer kojenerasyon sistemi işletme maliyetleridir.

Trijenerasyon sistemi ise, Şekil 1.16'da verilen şematik resimde görüldüğü gibi kojenerasyon sistemine ilave edilen absorbsiyonlu soğutma sistemiyle soğutma enerjisi üretebilen sistemdir.



Şekil 1.16. Kojenerasyon ile trijenerasyon arasındaki farkın şematik gösterimi

Trijenerasyon, tek bir enerji kaynağından hareketle mekanik (elektrik), ısı ve soğutma enerjilerinin eş zamanlı olarak üretilmesidir. Kojenerasyon sistemlerinden elde edilen atık ısı enerjisi genellikle iklimlendirme, sıcak su, buhar veya kızgın su–kızgın yağ üretiminde kullanılır. Yaz mevsiminde genellikle ihtiyaç duyulan ısı miktarı daha düşüktür, bu durumda elektrik üretim prosesinden açığa çıkan atık ısı absorbsiyonlu chiller vasıtasıyla iklimlendirme veya mevsimden bağımsız proses kullanımına yönelik olarak soğutma enerjisine dönüştürülebilir. Bu geliştirilmiş kojenerasyon prosesi genellikle trijenerasyon veya kombine soğutma, ısıtma ve güç üretimi olarak tanımlanmaktadır.

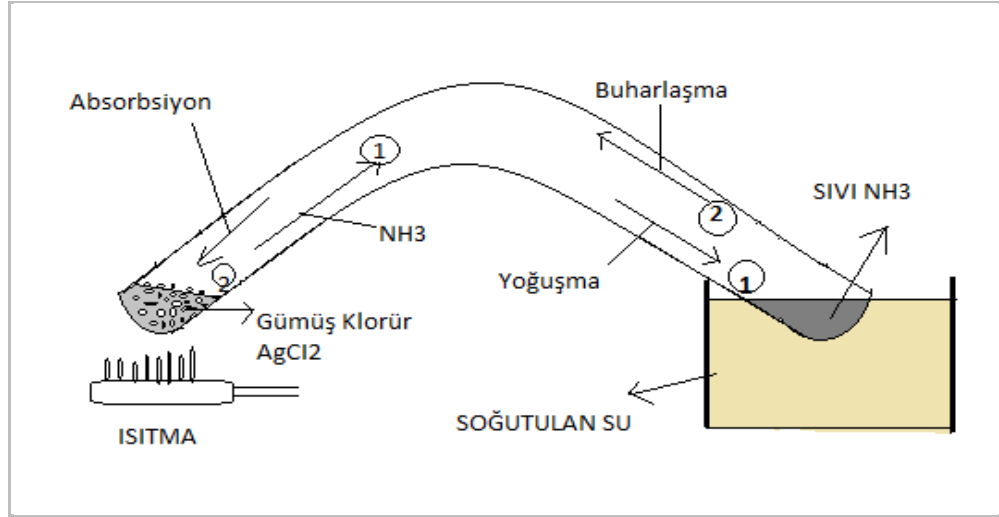
Isı enerjisini soğutma enerjisine dönüştüren absorbsiyonlu chiller, ilk defa Fransız bilim adamı Ferdinand Carré tarafından 1858 yılında bulundu ve su+sülfürik asit kullanıldı. 1926 yılında Albert Einstein ve öğrencisi Leó Szilárd tarafından Einstein refrigerator olarak bilinen alternatif dizayn şeklinde geliştirilerek 1930 yılında patenti alındı.

1.5. Absorpsiyonlu Soğutucu Nedir?

Isıyı kullanarak soğutma enerjisi üreten ekipmana “**Absorpsiyonlu Soğutucu**” denir. Kojenerasyonun atık ısısından sıcak su ve/veya buhar üretilerek Absorpsiyonlu soğutucu ile soğuk su üretilmekte ve üçlü üretime geçilmektedir. Bu çevrim genellikle sıcak suyun kış aylarında ısıtma için kullanılması ve yaz aylarında da atık ısının atmosfere atılmasının önlenmesi için kullanılmaktadır. İlk defa Michael Faraday tarafından bir asırdan fazla bir zaman önce Amonyagi (NH_3) yoğunlaştırma denemeleri sırasında keşfedilen Absorbsiyon prensibi, daha sonra bir soğutma çevrimi olarak uygulanıp bundan yararlanılmaya başlanılmıştır. Faraday’ın şekil 1.16’da gösterilen deney aygıtı, absorbsiyon soğutma çevriminin kavranması bakımından ilginçtir. Deneyin birinci kısmında Amonyaga karşı aşırı bir emiciliği olan, amonyak ile doyurulmuş gümüş klorür (AgCl_2) ısıtılırken deney tüpünün karşı ucu soğutma suyuna daldırılmış vaziyette tutulur. Kısa süre sonra, deney tüpünün soğutulan ucunda amonyagin yoğunlaşarak birikmeye başladığı görülür. Isıtılan uçtan amonyak tamamıyla soğutulan uca geçip sıvı halde toplandıktan sonra deneyin ikinci kısmına geçilir. Isıtma işlemi durdurulup soğutma suyu alınır. Çok kısa bir süre içerisinde, deney tüpünün soğutulan ucunda yoğunlaşarak toplanmış olan sıvı amonyagin kaynamaya başladığı ve tüpün bu kısmının aşırı derecede soğuduğu görülür. Bu olay sıvı amonyak tamamen buharlaşıp gümüş klorür tarafına taşınmaya kadar sürer. Deney tekrarlandığında aynı olayların tekrarlandığı görülür. Burada, gümüş klorür absorban madde, amonyak da soğutucu akışkan (soğutkan) madde rolünü oynamaktadır. Absorbsiyon soğutma çevriminde de daima iki akışkan mevcuttur: (1) Soğutkan madde, (2) Absorban madde. Aşağıdaki Faraday deney aygıtında, soğutma işleminin sürekli olmadığı hemen fark edilecektir ve pratik uygulama için bunun giderilmesi gerekmiştir. Bu gün ki absorbsiyonlu soğutma çevrimlerinde soğutma işleminin sürekliliği mutlaka sağlanmıştır. Ayrıca, gümüş klorür absorban madde yerini daha bol bulunan ve ekonomik olan maddelere bırakmıştır. Bugün en sık rastlanan soğutkan(R)-Absorban (A) madde çiftleri şunlardır;

- Amonyak (R)–su (A)

- Su (R)–Lityum Bromür (A)
- Su (R)–Lityum Klorür (A)
- Metilen Klorür (R)–Dimetil Eteri (Tetra Etilen Glikolin) (A)



Şekil 1.17. Faraday'ın absorpsiyon deney aygıtı

Absorpsiyonlu çillerlerde de çalışma prensibi, soğutma yapmak için çevrimli buharlaşma-yoğuşma döngüsüne dayanmaktadır. İlkinde buharın sıkıştırılması mekanik kompresörle yapılırken, Absorpsiyonlu çillerlerde bu işlem bir ısı kaynağından sağlanan enerjiyle gerçekleştirilmektedir. Bu ısının kaynağı, ya bir kazan kullanarak direk yakma, ya da; diğer proseslerden elde edilen buhar, sıcak su veya atık ısının değerlendirilmesi ile dolaylı yakmadır. Mevcut Absorpsiyonlu çillerler; düşük atık ısı enerjili tek-etkili (tek aşamalı jeneratör konfigürasyonu) çillerler veya ısı kaynağı olarak direk yakmalı ya da yüksek dereceli buhar kullanan enerji verimliliği yüksek çift-etkili (iki aşamalı jeneratör konfigürasyonu) çillerler olmak üzere iki kısımdırlar. Absorpsiyonlu çillerler, pik dönemde elektrik tüketimini azaltmakta, atık bir ısı kaynağıyla çalışmakta, az sayıda hareketli parçadan oluşmalarından dolayı daha az bakım gerektirmekte, daha sessiz çalışmakta ve zararlı refrigerant kullanmamaktadır.

Vakum altında hücre içine sprey halinde püskürtülen ve +3°C'de buharlaştırılan su ve boru demeti içinden geçen suyu soğutur. Ancak buharlaşma hücre doluncaya dek

sürdürülebilir. Gerekli hacmi tekrar sağlayabilmek için su buharının bir çeşit tuz (Lityum Bromür) yardımı ile emilmesi gerekir. İşlemin tekrarı için LiBr'ün ve suyun tekrar kullanılabilmesine bağlıdır. LiBr ısıtıldığında içerdiği suyu bırakır ve sistem çevriminin tekrarlanması sağlanır.

1.7. Absorbsiyonlu Soğutma Çevrimi

Soğutucu akışkan olarak su kullanılır. Su LiBr tarafından soğrulur. Soğurmalı soğutmanın temel ilkesi, buhar sıkıştırırmalı soğutma sistemine çok benzemektedir sadece kompresörün yerini bir soğurma mekanizması almaktadır. Soğurma mekanizması içinde: Soğurucu, pompa, ısıtıcı, ısı değiştirici, kısılma vanası ve ayırıcı vardır. Tüm bu mekanizma suyun basıncını yükseltmek için oluşturulmuştur. Su buharı buharlaştırıcıdan çıktıktan sonra soğurucuya girer burada LiBr içinde soğrularak ve kimyasal reaksiyona girerek LiBr Su çözeltisini oluşturur. Bu reaksiyon ekzotermik başka deyişle ısı veren reaksiyondur. LiBr içinde soğrulan su miktarı sıcaklıkla ters orantılıdır. Bu nedenle soğurucu sıcaklığını olabildiğince düşük tutmak ve buna bağlı olarak soğrulabilen su miktarını artırmak için soğurucudan ısı çekilir.

Su bakımından zengin olan LiBr Su çözeltisi daha sonra ısıtıcıya pompalanır. Çözelti ısıtıcıda buharlaştırılır ve ayırıcıya gider. Burada LiBr su bakımından zengin olan buhardan ayrılır ve ısıtıcıya geri döner. Saf su buharı ise yoğuşturucuya geçerek çevrimi sürdürür. Isıtıcıda kalan su bakımından zayıf LiBr su çözeltisi bir ısı değiştiricisinden geçer, pompadan çıkan çözeltiye bir miktar ısı verir ve daha sonra soğurucu basıncına kısılır. Bu sistemde buhar sıkıştırırmalı soğutma sisteminden önemli bir farkı buhar yerine sıvı sıkıştırılmaktadır. Sürekli akış işi özgül hacimle orantılı olduğu için, pompadan verilen iş kompresöre göre oldukça küçüktür. Dolayısı ile soğurmalı sistem için gerekli işte çok küçüktür. Bu verilen iş çevrime sağlanan ısının yüzde biri mertebesinde olup, çevrimin termodinamik çözümlemesinde genellikle ihmal edilir. Soğurmalı sistemlerde çevrimi çalıştıran enerji ısıdır. Oysa buhar sıkıştırırmalı çevrimlerde sistemi çalıştıran enerji elektrik işidir.

Soğurmalı soğutma sisteminin etkinlik katsayısı:

$$COP_{SM} = \text{elde edilmek istenen/harcanan} = Q_L / Q_{ısıtıcı} + W_{pompa} = Q_L / Q_{ısıtıcı}$$

Soğurmalı bir sistemin sahip olabileceği en büyük etkinlik katsayısı, çevrimin tümünden tersinir olması durumunda sağlanır. Çevrimde dış kaynaktan sağlanan ısıнын ($Q_{ısıtıcı}$) bir Carnot ısı makinesine verildiği düşünülürse, bu makinenin ürettiği iş ($W = \mu_{th,C} Q_{ısıtıcı}$) ile bir Carnot soğutma makinesi çalıştırılarak soğutulan ortamdan,

$Q_L = W * COP_{SM,C} = \mu_{th,C} Q_{ısıtıcı} COP_{SM,C}$ miktarda ısı çekilebilir bu durumda tümünden tersinir soğurmalı soğutma sisteminin etkinlik katsayısı,

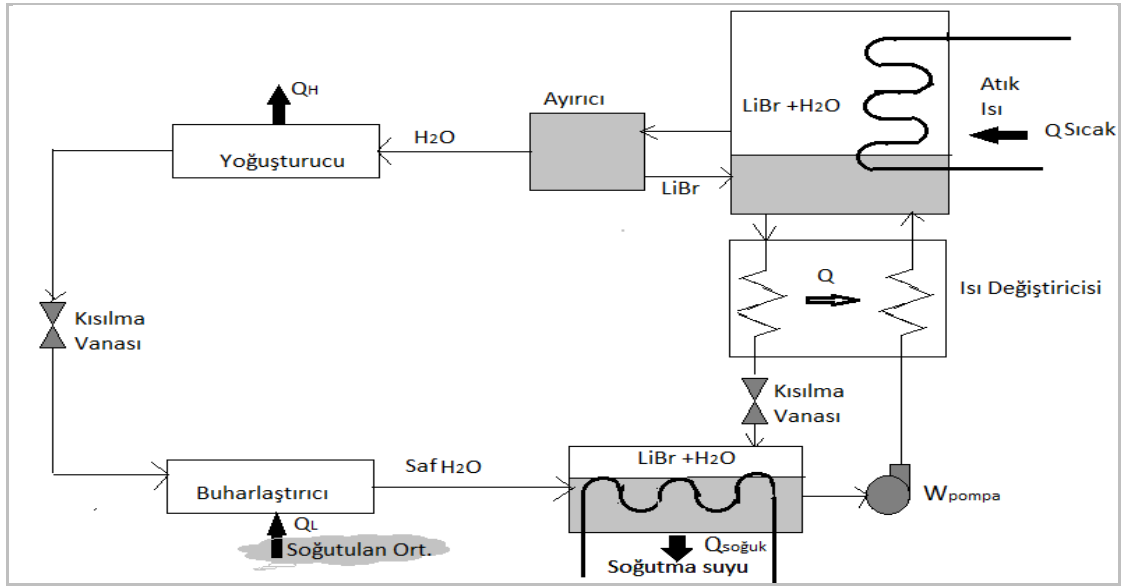
$$COP_{SM,tr} = Q_L / Q_{ısıtıcı} = \mu_{th,C} COP_{SM,C} = (1 - T_0 / T_{ısıtıcı}) (T_L / T_0 - T_L) \text{ olur.}$$

Burada T_L , T_0 ve $T_{ısıtıcı}$ sıcaklığındaki bir kaynaktan ısı sağlayıp, T_L sıcaklığındaki bir ortamdan ısı çeken ve T_0 sıcaklığındaki bir çevrede çalışan soğurmalı soğutma makinesinin etkinlik katsayısı yukarıdaki denklemden elde edilecek değerden daha küçük olacaktır. Örnek olarak ısı kaynağının sıcaklığı 80°C soğutulan ortamın sıcaklığı 18°C çevre sıcaklığı 30°C alınırsa $(1 - 30/80) * (18/30 - 18)$

Hesaplanırsa $COP_{SM,tr} = 0,9375$ elde edilir.

1.7.1. Tek etkili bir absorpsiyonlu çillerin çalışma prensibi

Genel olarak soğutma prensibi ısı transferi olup dört temel ısı transfer yüzeyi söz konusudur. Bunlar buharlaştırıcı, absorber, generatör ve yoğuşturucudur. Sisteme ait şematik resim Şekil 1.18’de verilmiştir.



Şekil 1.18. Tek etkili LiBr–H₂O çözeltili absorpsiyonlu soğutma sistemi şematik gösterimi

1.7.1.a. Evaporatör

Soğutucu akışkan genişler ve alt kovanın üst kısmına girerek, pompalanan ve buharlaştırıcı boru demeti üzerine püskürtülen soğutucu sıvısına katılır. Soğuyan sıvının açığa çıkardığı ısı soğutucu malzemesinin bir kısmını buharlaştırır.

1.7.1.b. Absorber

Soğutucu malzeme buharı alt kovanın alt yarısına ulaşır. Burada buhar bir Lityum Bromür çözeltisi tarafından emilir. Lityum Bromür aslında suda çözülmüş bir tuzdan başka bir şey değildir. Ancak Lityum Bromür, 38°C sıcaklığının üzerinde bile güçlü bir su çekici maddedir. Lityum Bromür püskürtülmesi, soğutucu madde buharını tutan yüzlerce küçük sünger gibi bir etki yaratmaktadır. Lityum bromür ve yoğuşmuş soğutucu madde buharı karışımı (seyreltik çözelti) bundan sonra alt kovanın dibinde toplanır. Çözelti ısı, absorber borularından geçen soğutma suyu tarafından uzaklaştırılır.

1.7.1.c. Generatör

Seyreltik çözelti daha sonra, generatörden sıcak yoğunlaştırılmış çözelti tarafından ön ısıtmaya tabi tutulduğu ısıtıcının içine pompalanır. Isıtıcı generatördeki seyreltik çözeltinin ısıtılması için gereken buhar ya da sıcak suyun miktarını azaltmak suretiyle çevrimin etkinliğini yükseltir. Sonra seyreltik çözelti, basıncın dış atmosfer basıncının yaklaşık onda biri ya da 70 mm civa basıncı kadar olduğu yoğuşturucu ve üretici içeren üst kovana doğru yoluna devam eder. Seyreltik çözelti üreteç borularından geçer ve buhar ya da sıcak sutarafından ısıtılır.

Buhar ya da sıcak sudan kaynaklanan ısı girişinin miktarı bir valf tarafından kontrol edilir ve gereken soğutma yüküne karşılık olacak şekilde belirlenir. Sıcak generatör boruları seyreltik çözeltiyi kaynatarak soğutucu malzeme buharının serbest kalmasını sağlarlar ki bu da çözeltinin yeniden yoğuşmasına yol açar.

1.7.1.d. Yoğuşturucu

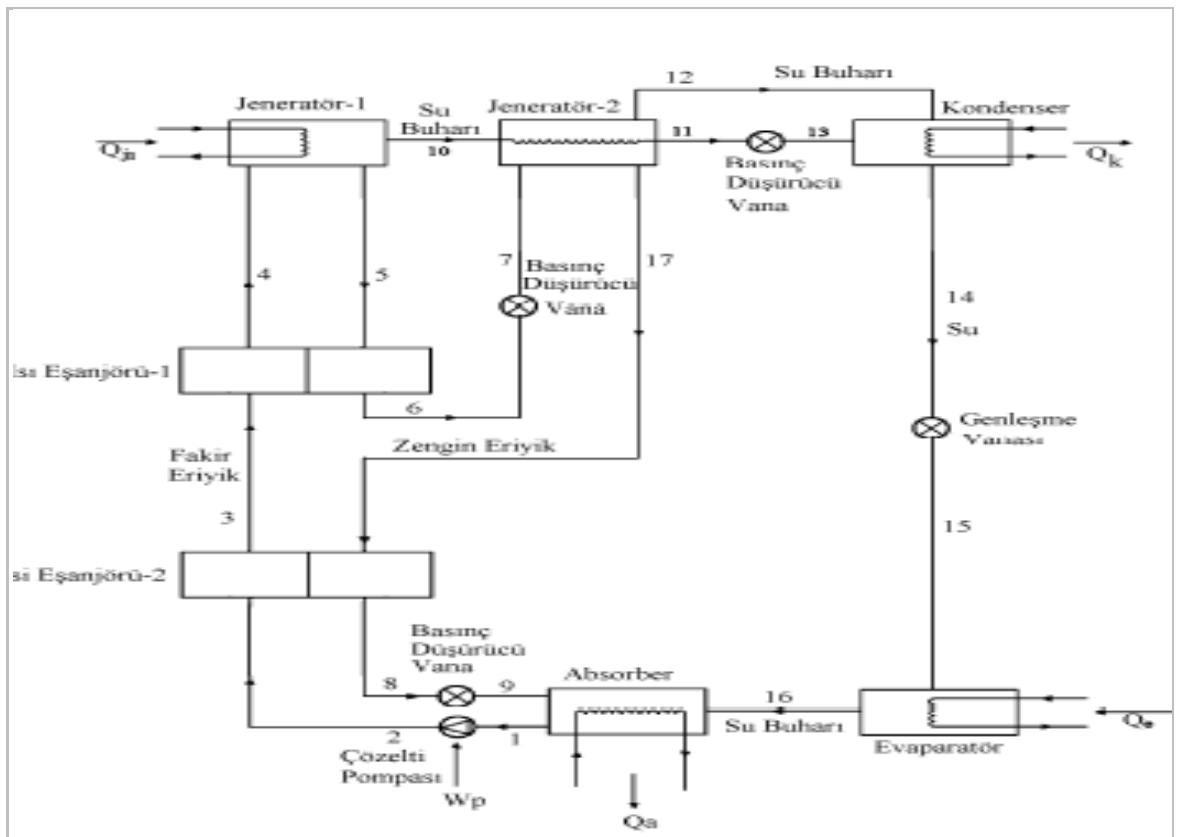
Soğutucu malzeme buharı yoğuşturucuya kadar yükselir ve yoğuşturucu borularından akmakta olan suyun soğutucu etkisi ile yoğuşur. Sıvı soğutucu alt kovana geri döner ve devridaim yaptırılan soğutucu ile yeniden püskürtmeye tabi tutulur. Soğutucu malzeme çevrimi generatörden, alt konanda bulunan ve yeniden soğutucu malzeme emmeye hazır olan emiciye geri döner. Lityum Bromür çevrimi de böylece tamamlanmış olur..

Absorbsiyon üniteleri hastanelerde, apartman ve ofis binalarında, üniversitelerde, buz patenleri, hemşire evleri, oteller, perakendeliler, endüstriyel tesisler ve diğerleri ve çok katlı meskenlerin iklimlendirilmesinde soğuk su sağlamak için kullanılabilir.

1.7.2. Çift etkili LiBr-H₂O akışkanlı absorpsiyonlu soğutma sistemi

Şematik resmi Şekil 1.19'da verilen çift etkili sistemlerde iki adet jeneratör kullanımı ile soğutma gücü arttırılarak COP iyileşmesi sağlanır. Sistemde evaporatör, kondenser,

absorber, iki jeneratör ve iki adet ısı değıştirgeci vardır. Sistem elemanları üç farklı basınç kategorisinde çalışmaktadırlar: Yüksek basınç, orta basınç ve düşük basınç. Birinci jeneratör yüksek basınçta, ikinci jeneratör ve kondenser orta basınçta, evaporatör ve absorber ise düşük basınçta çalışır. Birinci jeneratördeki yüksek basınç bir pompa vasıtasıyla sağlanmaktadır. İkinci jeneratör ve kondenser orta basıncı iki adet basınç düşürücü vana ile sağlanır. Absorberdeki düşük basınç bir basınç düşürücü vana ile evaporatör düşük basıncı ise bir kısılma vanası ile elde edilir.



Şekil 1.19. Çift etkili LiBr –H₂O çözeltili absorpsiyonlu soğutma sistemi şematik gösterimi

Bu sistemde LiBr-su akışkan çiftinden LiBr absorber, su ise soğutucu olarak kullanılmaktadır. Absorberden çıkan LiBr-su çözeltisi sırasıyla ikinci ısı eşanjörü, birinci ısı eşanjörü, birinci jeneratör, birinci ısı eşanjörü, ikinci jeneratör, ikinci ısı eşanjörünü dolaştıktan sonra tekrar absorbere girer. Birinci jeneratörde buharlaşan su, ikinci jeneratörden geçerek kondensere girer. İkinci jeneratörde ayrılan su kondensere

girerek diğ er su buharıyla birleşir. Kondenserden çıkan su evaporatörden geçerek absorbere girer ve burada çözelti tarafından absorbe edilir. Çevrim bu şekilde devam eder. Temel çalışma sıcaklıkları; birinci ve ikinci jeneratör, kondenser, evaporatör, absorber sıcaklıklarıdır. Temel çalışma basınçları; birinci jeneratördeki yüksek basınç, ikinci jeneratör ve kondenserdeki orta basınç, evaporatör ve absorberdeki düşük basınçlardır.

Çok çeşitli soğutma-absorbent çiftleri kullanılmaktadır. Onlar arasında en sık tercih edilen ikisi su-lityum bromür (LiBr) ve amonyum-su çiftleridir. Her iki çift de iyi bir termodinamik performans sergilemektedir. Ancak LiBr çözeltileri onların yüksek hidratasyon ısısı, katı fazın yüksek çözünürlüğü ve uygun vizkozitesi nedeniyle absorbent olarak oldukça arzulanan özelliklere sahiptir.

1.7.3. Absorbsiyonlu soğutma sisteminin avantaj ve dezavantajları

Avantajları:

- Hareketli parçaların az olmasından dolayı sessiz çalışması.
- Kolay ayarlanabilir, kontrol edilebilir ve uzun ömürlü olması.
- %0–100 arasında değişebilen soğutma yükü sağlayabilmesi.
- Sıcaklık değişimlerinin genleşme valfindaki küçük değişimlerle korunabilir olması
- Buharlaştırıcı basınç ve sıcaklıklarında düşme olduğunda, soğutma kapasitesinde çok az bir düşme olması
- Hızlı bir soğutma yükü sağlaması
- Buhar sıkıştırılmalı sistemlerde kullanılan elektrik enerjisinin %2-9 kadarının kullanılması
- Atık ısı kaynaklarını kullanarak çalışabilmesi (Kayfeci vd 2009).

Dezavantajları:

- İlk yatırım maliyetlerinin yüksek olması
- COP değerlerinin düşük olması
- Sistemin ağır ve hantal olması
- Soğutma modanda istenilen yeni değere çok yavaş ulaşması
- Korozyona neden olan kimyasallar kullanıldığından cihaz ömrünün sınırlı olması
- Absorbent ömrünün kısa olması (Kayfeci vd 2009).

1.8. Tez Çalışmasının Amacı

Bu çalışmada Erzurum’da yapımı planlanan, 13 blok halinde, toplam 168463 m² kapalı alana sahip, 800 yatak kapasiteli Kampüs Hastanesi için enerji verimliliği sağlaması amacı ile Trijenerasyon sisteminin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Trijenerasyon sisteminde güç üreticisi olarak otto çevrim prensibi ile çalışan doğalgaz yakıtlı motor seçilmiştir. Erzurum şartlarında çalışacak kampüs hastanesinin bir yıl boyunca talep edeceği saatlik enerji ihtiyacını maksimum düzeyde karşılayacak sistemin elemanları üzerine oluşturulan model yardımıyla, yıl boyunca sistemin çalışma rejiminin belirlenmesi ile sistemden üretilecek ısıtma, soğutma ve elektrik enerjisi miktarının ne olacağı ve buna karşılık sistemin tüketeceği yakıt miktarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu veriler ışığında sistemin ekonomik analizi yapılarak yıl boyunca gelir gider tabloları oluşturulup sistemin karlılığı ve geri ödeme süresinin belirlenmesi nihai amaçtır. Çalışmanın sonucunda ise yıl içindeki aylara göre saatlik olarak belirlenen çalışma rejimi göz önüne alınarak modellenen trijenerasyon sisteminin, verileri ışığında hastaneler için trijenerasyon sisteminin ne derece uygun olduğu ve bu sistemden nasıl daha iyi yararlanabileceğimiz tartışılacaktır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Trijenerasyon Çalışmalarına Genel Bakış

Literatürlerde yapılan araştırmalarda trijenerasyon ve kojenerasyon sistemleri üzerine birçok çalışma yapıldığı görülmektedir.

Smith (1995), hastane tesislerinde enerji verimliliği için iki motorlu kojenerasyon sistemi özelliklerini üzerine yaptıkları çalışmada, elektrik gücünün elde edilmesinde optimizasyon için belirlenen gücün kas kat olarak iki motordan elde edilmesi ve bu durumunun verimliliğini incelemiştir. Hastanelerin günün saatlarına göre değişen elektrik enerjisi taleplerini en efektif sistem verimi ile karşılayabilmek için güç üreticilerin kas kat olarak dizayn edilmesinin uygun olduğunu tespit etmişlerdir.

Aikins (1995), gaz türbinli kojenerasyon sistemlerini incelediği çalışmada 6.24 MW termik ve 3.5 MW elektriksel güçteki bir tesis için elektrik fiyatlandırması yapmıştır. Kojenerasyon sisteminin maliyeti; ilk yatırım maliyeti, işletme ömrü ve faize bağlı bir amortisman faktörü ile çarpılmış ve bu değere yakıt ve diğer giderlerin eklenmesiyle hesaplanmıştır. Aynı ısıl gücün konvansiyonel bir kazan ile sağlanması halinde de aynı maliyet analizi yapılmıştır. Bu iki maliyet analizinin birbirinden çıkartılmasıyla bulunan farkın kojenerasyon sisteminin elektrik üretim değerine bölünmesiyle de elektrik fiyatlandırması yapılmıştır.

Derbentli (1996), yaptığı çalışmada, kojenerasyon sisteminin seçiminde kullanılacak parametreleri incelemiş, termodinamik ve ekonomik analizi bir örnekle açıklanmıştır. Bileşik ısı gücü üretiminin ekonomik olup olmayacağının yıllık kazançlarla yıllık giderlerin karşılaştırılması sonucu tespit edileceği belirtilmiştir. Ayrıca faiz ve yakıt fiyatlarının düşük, elektrik ve ısı fiyatlarının yüksek olmasının uygulamayı olumlu yönde etkileyeceğini bildirmiştir.

Frangopoulos *et al.* (1996), kombine çevrimli kojenerasyon sistemi ile çalışan Yunanistan Aspropyrgos Rafinerisinde (HAR) termoeconomik yönden optimazasyon modeli üzerinde yaptıkları çalışmada HAR petrol rafinerisi günde 130000 varil petrol üretmişlerdir. Rafinerinin elektrik ve ısı ihtiyacı 54 MW kapasiteli kombine çevrimli kojenerasyon santralinden karşılanmıştır. Santralde iki adet gaz türbini, iki adet atık ısı kazanı, dört adet yakıt kazanı ve bir adet buhar türbini bulunmakra olup, yüksek, orta, düşük ve çok düşük olarak dört farklı basınçüretilmiştir. Yakıt kazanları düşük sülfür yakıtıyla çalışırken gaz türbinleri dizel yakıt ve LPG ile çalışmıştır. Çevresel, ekonomik ve teknik şartlar belirlendikten sonra gereksinim duyulan elektrik ve buhar miktarları için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Sistemin ekonomik yönden minimum masraf modeli belirlenmiştir. Optimizasyon çözümlmeleri için uygun paket program geliştirilmiştir.

Mostafavi and Agnew (1997), bir dizel motorun egzoz gazlarından sağladıkları ısı enerjisinin absorbsiyonlu soğutma sistemlerinde kullanılması ve sistemin termodinamik modellenmesi konusunda çalışmalar yapmışlardır.

Riad and Michel (1998), üretim tesislerinde enerjinin korunması, rasyonel kullanımı ve enerji yönetiminin gerekliliği üzerine yaptıkları çalışmada, enerji kaynaklarının tasarruflu kullanımıyla çevre kirliliğinin önlenecğini savunmuşlar, konvansiyonel ve kojenerasyon sistemlerde ilk enerji, elektrik enerjisi ve termal enerjilerin birim maliyetlerini hesaplayıp termo-ekonomik analizlerini karşılaştırmışlardır. Sonuçta kojenerasyon sistemlerinin verimliliğini göstermişlerdir. Çalışmalarında üç tesis (hastane kalorifer kazanı, kurutma işlemi, kağıt üretimi) için global ekonomik analiz yaparak strateji çeşitlerinin maliyete etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Ekipmanların ekonomik ömrünün ilk yatırımın geri kazanılmasında önemli olduğunu ve irreversibilitenin ilk yatırıma etkisini belirlemek için ekserji çalışmasının gerekliliğini vurgulamışlardır.

Bidini *et al.* (1999), tarafından incelenen çalışmada, Perugia Üniversitesinin Mühendislik Fakültesinde ki 1 MW Cater-Pillar-3516 doğalgaz yakan motorda bileşik

ısı güç üretiminde gerçek performans analizi yapılmıştır. Analizde; doğalgaz akış oranı, elektriksel verim gibi değerlerin sistemin yönetici operatörü tarafından 24 ay süresince toplanan günlük verilerin analizi yapılmak sureti ile kazanç sistemi oluşturulmuştur. Yıl boyunca toplanan verilerden kojenerasyon sistemin ekonomikliliği, teknik açıdan toplam verimi, çevreyi kirleten emisyon oranlarının azaldığı tespit edilmiştir.

Arıkan vd (2000), İTÜ-TÜSİAD URBAN-M3 projesinde, deprem bölgesindeki yeni konutlaşma için küçük ölçekli kojenerasyon uygulaması konusunda çalışmışlardır. Bu proje, 785 konut ve sosyal tesislerle birlikte 92000 m² inşaat alanına sahiptir. Isı merkezi gücü toplam 12000 kW, elektrik pik yükü 1200 kW dır. Geri kazanılan ısının tamamı ile 103-80°C, 45 ton/h su üretmesi amaçlanmıştır. Bu su kışın ısınma için kullanılırken yazın ise 105-80°C su kullanılarak 140 ton/h 12-7°C soğuk su üretilmesi amaçlanmıştır. Türkiye’de kullanılan doğalgaz analizine göre Waukesha tarafından Özel Uygulama onayı verilen sistemle ilgili işletme ve teknik veriler Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Waukesha onayı verilen sistemin sayısal analizi

Model	P48GLD/2
Devir	1500 d/d
Net elektrik enerjisi	788 kVA (alternatör çıkışında)
Net elektrik üretim verimi	% 36.03 (alternatör çıkışında)
Birim yakıt tüketimi	9993±%4 kJ/kWh
Doğalgaz tüketimi	228 m ³ /st (H _u =8250 kcal/m ³)
Egzoz sıcaklığı	392 °C ± 28 °C
Egzoz debisi	4523 kg/st
Emiş havası	3411 Nm ³ /st
Egzoz (toplam)	540 kW
Egzoz (geri kazanılan)	388 kW
Toplam yararlanılan ısı	1202 kW

Geri kazanılan ısının tamamı ile 103-80°C, 45 ton/h su üretilmesi hedeflenmiştir. Bu su kışın, ısınma veya kullanım amaçlı 26 ton/h 70-30°C sıcak su üretiminde

değerlendirilecektir. Yazın ise 105-80°C su kullanılarak 140 ton/h 12-7°C soğuk su üretilecektir. Ekonomik analizde aşağıdaki değerler esas alınmıştır (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2. Waukesha onayı verilen sistemin ekonomik analizi

Motor kapasitesi (kVA)	788	Sitede kullanılan elektrik (kWh/yıl)	4320000
Elektrik verimi (%100 kapasitede)	36	TEDAŞ elektrik satış fiyatı (\$/kWh)	0.046
Isı verimi (%100 kapasitede)	55	Doğalgaz fiyatı (\$/m ³)	0.208
Elektrik verimi (%50 kapasitede)	32	Doğalgaz alt ısı değeri (kcal/m ³)	8250
Isı verimi (%50 kapasitede)	61	Birim bakım onarım gideri (cent/kWh)	0.0065
Kazan verimi (%)	85	Kojenerasyon birim yatırım maliyeti (\$/kW)	600
Kış çalışması (saat)	4234	Kazan birim yatırım maliyeti (\$/kW)	30
Yaz çalışması (saat)	4104	Jeneratör birim yatırım maliyeti (\$/kW)	120
Elektrik fiyatı (\$/kWh)	0.071		

Bu verilere göre üretilen elektrik ve ısı enerjisinin satışlarından sağlanan gelirler elektrik ve ısı gelirleri olarak hesaplanmıştır. Doğalgaz ve bakım-onarım giderleri de hesaplanarak yıllık toplam gelir-gider durumu çıkartılmış, toplam yıllık kâr elde edilmiştir. Kojenerasyon tesisinin toplam maliyeti hesaplanarak geri ödeme süresi bulunmuştur. Teknik analizde ise elektrik üretimi, geri kazanabilecek ısı, toplam yararlı enerji, tüketilen yakıt değerlerine göre sistem verimi, gerekli doğalgaz miktarı hesaplanmıştır. Bu çalışmada kojenerasyon sistemi kullanılarak konut başına 437 m³/yıl doğalgaz tasarrufu sağlanmıştır. Doğalgaz ve bakım-onarım giderleri de hesaplanarak yıllık toplam gelir-gider durumu çıkartılmış, toplam yıllık kar elde edilmiştir. Kojenerasyon tesisinin toplam maliyeti hesaplanarak geri ödeme süresi bulunmuştur. Bu çalışmada kojenerasyon sistemi kullanılarak konut başına 437 m³/yıl doğalgaz tasarrufu sağlanmıştır.

Luz-Silveira *et al.* (2002), yapmış oldukları çalışmada üniversite kampüsü için kojenerasyon sisteminin termoekonomik analizini yapmışlardır. Kampüs olarak

California, USA San Diego Eyalet Üniversitesi seçilmiştir. Üniversite yılın her günü yirmi dört saat çalışmaktadır. İhtiyaç duyduğu elektrik ve doğalgazı San Diego Gaz ve Elektrik biriminden kullanım suyunu ise San Diego Belediyesinden satın alınmıştır. Yerleşkenin elektrik ihtiyacı 9 MW olup tasarlanan kojenerasyon sistemi ile bu değerin yaklaşık 1/3'ü sağlanmaktadır. Üzerinde yapılan çalışmalarla sisteme 10 yıllık ekonomik ömür belirlenmiştir. Santral 466.84 m² alan için tasarlanmış olup 3355.65 kW gücünde gaz türbini ile 3 MW'lık jeneratörü çalıştırmaktadır. Egzoz gazlarının değerlendirilmesi için gaz türbini çıkışına atık ısı kazanı yerleştirilmiştir.

İnalı vd (2002), yapmış oldukları çalışmada kojenerasyon sistemlerinin teknik ve ekonomik uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Kojenerasyon sistemleri teknik yönden incelenmiş ve formül seti termodinamik çevrimlere göre oluşturulmuştur. Kapasite seçimi sırasındaki kriterler belirlenmiştir. Bu kriterler; işletmenin elektrik-ısı tüketim yapısı, yıllık çalışma süresi, enerji ihtiyacı seviyesi ve birincil enerji kaynaklarının temin edilebilirliği ve ekonomik uygulanabilirliğidir.

Kojenerasyon sistemlerinin ekonomik uygulanabilirliği üzerine yapılan çalışmada, yıllık net işletme geliri, bölgenin ısı ve elektrik gereksinimlerinin ayrı ayrı karşılanması durumunda, yıllık olarak ödenecek ısıtma, elektrik, personel, bakım-onarım giderlerinin toplamının çıkartılmasıyla hesaplanmıştır. Yatırım gideri ise kojenerasyon sisteminin satın alınması ve kurulması ile ilgili olarak başlangıçta ödenen parasal değerdir. Bu değerler belirlendikten sonra geri ödeme süresi, şimdiki değer, yıllık net kazanç gibi ekonomik analiz yöntemlerinden biri ile yatırım karlılığı hesaplanmıştır.

Szkloet *al.* (2004), yaptıkları çalışmada, Brezilyadaki hastane sektöründe Trijenerasyon sisteminin teknik potansiyeli ve enerji tüketimi göstergelerini araştırmışlar ve bir Trijenerasyon sisteminden elektrik, ısıtma ve soğutma enerjisi elde etmenin fiyatlarını incelemişlerdir. Elektriğin gerçek ihtiyacına göre ısıtma ve soğutma için motor türbin ve çiller seçimi yapılması gerektiği sonucuna varmışlardır. Böyle bir sistem için bu çalışmada yıl boyunca en iyi çalışma durumunun bulunması da araştırılmıştır.

Rodriguez-Alvarez *et al.* (2004), yaptıkları çalışmada, ispanya devlet hastanelerinin maliyetleri ve verimsiz işletme durumlarını incelemişlerdir.

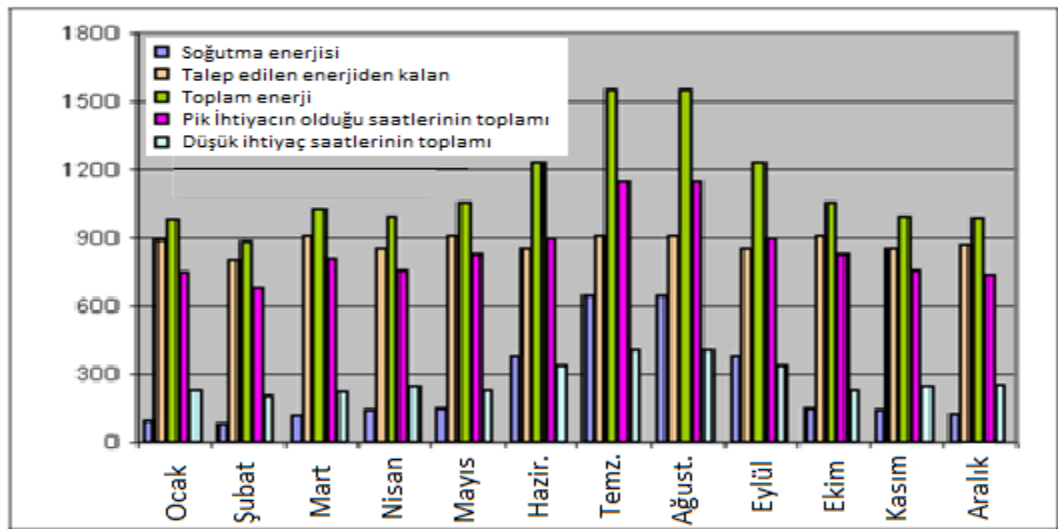
Meckler (2004), tarafından yapılan çalışmada sağlık kompleksi için BCHP (Building Cooling Heating and Power) dizaynını ve verimli çalışma şartları incelenmiştir.

Fragiacomo *et al.* (2005), İtalya’da 950 yatak kapasiteli bir hastanenin enerji talebini karşılamak amacıyla yürüttükleri çalışmada, bir trijenerasyon sisteminin optimal tasarımını incelemişlerdir. Sistemi ifade etmek için optimizasyon için Branch and Bound method’unu kullanmışlardır. Ekonomik getiriyi maksimize edebilmek için lineer programlamaya dayalı modeller oluşturulmuş, hem günün saatleri hem optimal çalışma stratejisi ile uygun kapasitelerin belirlenmesine yönelik bir tasarım modeli oluşturmuşlardır. Hastanenin elektrik talebindeki değişimin nasıl olacağının belirlenmesinde yıl içinde rastgele belirlenmiş 6 gün için hastanenin saatlik elektrik tüketim değerleri alınmıştır. Bu altı gün yaz, kış ve geçiş mevsimi olan Nisan döneminde hafta içi ve hafta sonu günleri olmak üzere belirlenmiş ve bu günlere ait saatlik enerji tüketim değerleri hastane kayıtlarından alınarak aylık ortalamaları belirlenmiştir. Bu tüketim değerlerini karşılayacak optimum seçilecek sistem kapasitesi ile sistemin maliyetleri çıkarılmış, uzun ve kısa vadeli finansal yatırım modelleri oluşturulmuştur. İlk yatırım maliyeti, işletme maliyetleri ile sistemin getirisi karşılaştırılarak finansal analiz gerçekleştirilmiştir. Elektrik tüketiminin büyük müşterisi olan hastaneler için trijenerasyon sisteminin uygulamasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Ziher and Poredos (2005), Slovenya’nın en büyük hastanesi için kurulabilecek 4.2 MW kapasiteli gaz türbinli bir Trijenerasyon sistemini ekonomik yönünden inceledikleri çalışmada, ihtiyaç duyulan ısı enerjisinin karşılanamaması durumunda kullanılmak üzere yardımcı bir boyler sistemi de düşünülmüştür. Yapılan ekonomik analizlerin sonucunda Trijenerasyon sisteminin karlı olacağı ve geri ödeme süresinin’de 5.8 olacağı sonucuna varılmıştır. Bu tip sistemlerde soğutma biriminin de olması halinde ilk yatırıma ek maliyet getireceği, ancak geri ödeme süresini kısaltma yönünde olumlu katkısının olacağı belirtilmiştir. Bu çalışmanın ikinci kısmında ise klasik bir soğutma sistemi ile

absorpsiyonlu çiller kullanılarak kurulmuş bir trijenerasyon sistemine uygulanacak soğutma sistemi ekonomiklik yönünden kıyaslanmış ve trijenerasyonlu uygulamanın çok daha avantajlı olduğu gösterilmiştir. Bu çalışma da, elektrik, ısıtma ve soğutma enerjisinin kombine edilmiş üretiminde trijenerasyon olarak bilinen sistemin Norveç te ki en büyük hastanesi için teknik olarak mümkün olabileceğini göstermiştir. Ancak bu çalışma tam olarak sistemin çalışmasını optimize edememiştir. Fakat soğutma üretiminin optimizasyonuna ve sunulan sistemin ekonomisine yönelik çalışmalara yoğunluk verilmiştir. Sistemin geri ödeme süresinin düşük, karlılık değerinin ise 1'den fazla olduğunu göstermiştir. Geri ödeme süresini kojenerasyon sistemi ile 6.71 yıl, trijenerasyon sistemiyle 5.86 yıl olarak bulmuştur.

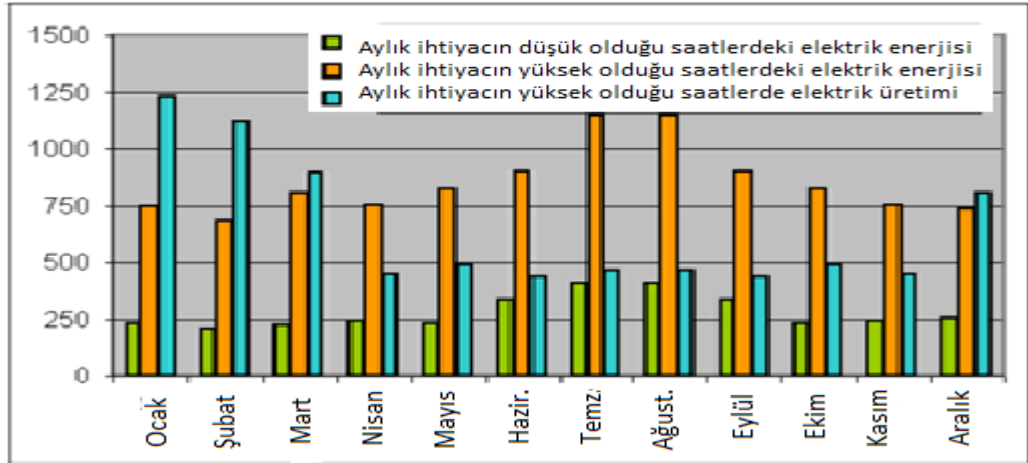
Renedo *et al* (2005), İspanyanın Santander şehrin de bulunan 25 bloktan oluşan 80.000 m² kapalı alana sahip, 1000 hasta yatak kapasiteli bir hastane için yaptıkları çalışmada dizel motorlu ve gaz türbinli kojenerasyon sistemlerini karşılaştırmışlardır. Hastanenin aylık elektrik tüketim değerleri Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Hastanenin aylık elektrik talebi (MWh)

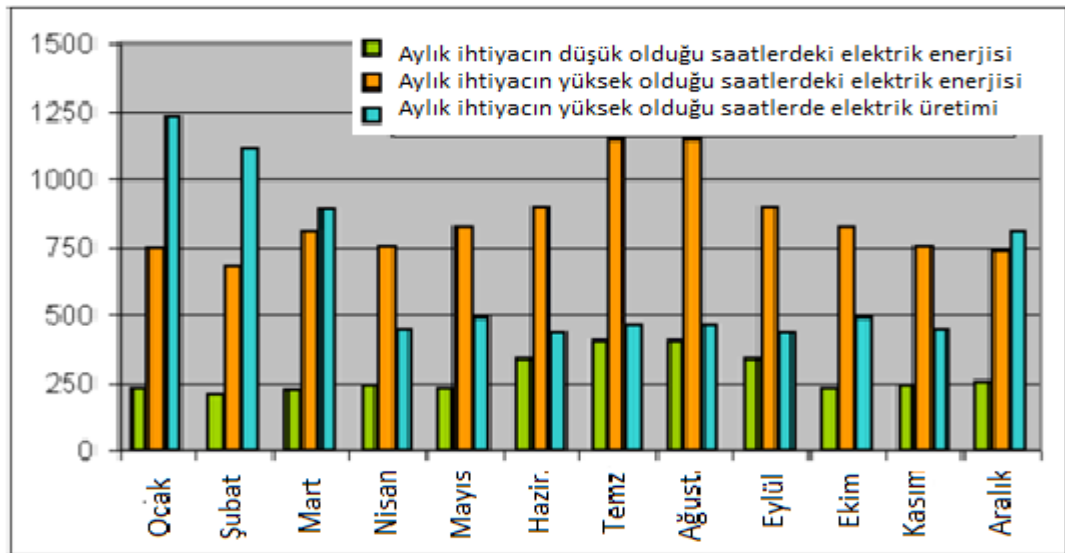
Hastane için dizel motorlu çalışmada 4000 kWe gücünde elektrik çıktısı olan bir kojenerasyon santrali ele almışlardır. Çalışma periyodu boyunca performansın düşmemesi ve motorların nominal yüke yakın çalıştırılabilmesi için toplam yük 1500 ve

2500 kWe olarak ikiye bölünmüştür. Bu iki motorla sistemin aylık elektrik denge dağılımı Şekil 2.2’de verilmiştir. Hastanenin talebinden fazla üretilen elektrik şebekeye satılmaktadır.



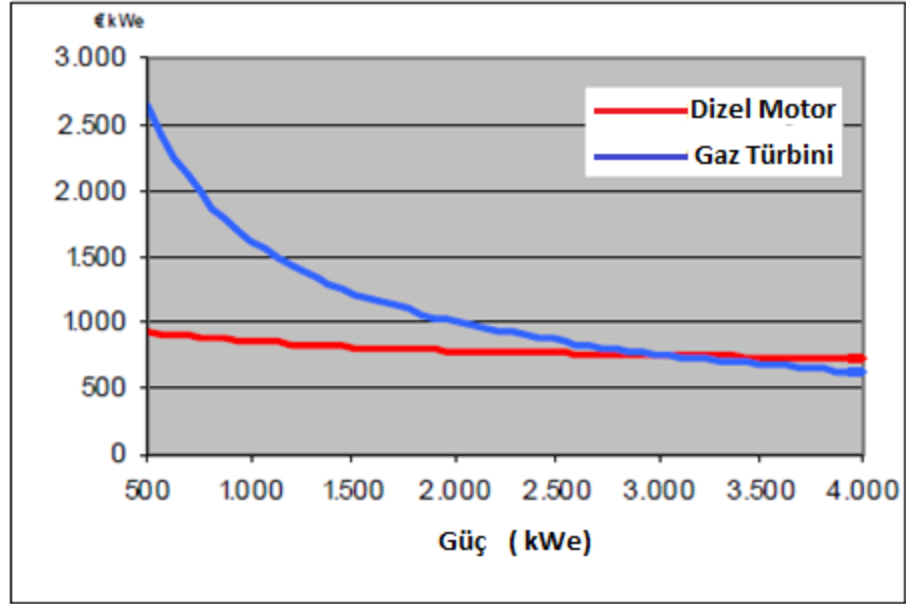
Şekil 2.2. 2500 ve 1500kWe kapasite ile çalışan iki dizel motorlarla üretilen aylık elektrik dengesi

Aynı hastane için kojenerasyon tesisi 2650 kWe ve 1350kWe kapasitelere sahip iki gaz türbini ile değerlendirilmiş ve aylık elektrik denge dağılımı Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3. 2650 ve 1350kWe kapasite ile çalışan iki Gaz Türbini ile üretilen aylık elektrik dengesi

Kojenerasyon sistemi ile bir birim elektrik üretimi için dizel motorlu ve gaz türbinli sistemin üretim maliyeti analizi karşılaştırılmış ve çıkan sonuçlar Şekil 2.4’de verilmiştir.



Şekil 2.4. Gaz türbinli ve dizel motorlu kojenerasyon sistemlerinin elektrik üretim maliyetlerinin karşılaştırılması.

Bu çalışma ile hastaneler için sürekli değişen elektrik talebini karşılamak için, motorlu sistemlerin türbinli sistemlere göre daha uygun sonuçlar verdiğini, motorlu sistemlerin ise tam yükte çalıştırılmasının daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır.

Badaniç *et al.* (2005), FIAT’ın İtalya’daki araştırma geliştirme merkezinde 120kWe’lık doğalgaz motoruyla kurulmuş bir kojenerasyon sistemin analizini yaptıkları çalışmada modifiye edilmiş normal bir araç motoru kullanılmıştır. Araç motorunun farklı yüklerle çok çabuk geçebilmesi ve farklı devirlerde çalışabilmesi için iki farklı parametre olmuştur. Yapılan incelemeler sonucunda yaklaşık olarak aynı kapasitelerde olana geleneksel kojenerasyon sistemleri ile yeni dizayn edilen araç motorlu kojenerasyon sistemi karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda araç motorunun değişik yüklerde daha uygun çalışma koşulları olduğundan dolayı konvansiyonel motorlara nazaran daha verimli olduğu ortaya çıkmıştır. Motorun elektriksel verimi %50 civarında bulunmuştur.

Bunun yanında araç motorunun kısmi yüklemeler için normal motorlara göre çok üstün olduğu belirtilmiştir. Bu motorların kojenerasyon sistemlerinde kullanılabilmesi için iyi bir kısmi yük optimizasyonu gerektiği söylenmiştir. Motorun devir sayısı artırıldığında motorun daha kısa peryotda daha fazla güce ulaştığı tespit etmişlerdir..

Kıncay ve Yumurtacı (2006), yıldız Teknik Üniversitesi Davut Paşa kampusunu baz almak sureti ile bir üniversite kampusu için en uygun kojenerasyon sisteminin ekonomik analizini yapmışlardır. Yapılan çalışmada kurulacak kojenerasyon tesisinin toplam geliri yıllık 1.884.171,4 \$, giderleri 1.310.499,3 \$, geri ödeme süresi ise 1.25 yıl olarak hesaplanmıştır. İkili yaptıkları çalışmanın sonucunda kojenerasyon sistemlerinin maliyetinin belirlenmesinde en önemli faktörün doğalgazın fiyatları olduğunu savunmuşlardır. Doğalgazın birim fiyatının değişimine göre ve Türkiye gibi doğalgaz ithal eden ülkelerde dövizin kuruna bağlı olarak sistem maliyetlerinin değişeceğini, bunun neticesi olarak da amortisman sürelerinin değişeceğini belirtmişlerdir. Bir kojenerasyon tesisi tasarımı yapılırken ön çalışmaların iyi yapılması ve ihtiyaçların iyi belirlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Yapılan çalışmanın sonucunda kojenerasyon tesislerinin bu gibi kuruluşlar için cazip, uygun ve karlı sistemler olduğunu belirtmişlerdir.

Tien *et al.* (2007), gemilerde kojenerasyon uygulaması üzerine yaptıkları çalışmada, sistemde geminin egzoz gazlarından ve soğutma suyunun ısı enerjisinden nasıl faydalanılabileceği araştırmışlardır. İlgili parametreler boylerden ve kondenserden çıkan akışkanların sıcaklığı, boylerin ısıtma yüzeyi, egzoz gazlarının çıkış debi ve sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Dizel motorlu gemiden çıkan egzoz gazlarını kullanarak elektrik üretebilmek için özel bir atık ısı kazanı dizayn edilmiştir. Sonuç olarak gemilerde bu tip bir kojenerasyon sistemini uygun olacağı ve yakıt tüketimini azaltacağı için salınan emisyonlarda da ciddi azalmalar olacağı vurgulanmıştır.

YT, *et al.* (2009), simülasyon ve deneysel olarak bir trijenerasyon sisteminin performans değerlendirmesini inceledikleri çalışmada, laboratuvar ortamında bir mikro türbin kullanılarak sistem performansı üzerine bazı parametrelerin etkilerini göstermek

amacıyla yaptıkları deneyin performans değerlerini, oluşturulan simülasyon programı sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada Erzurum’da yapılacak olan Sağlık Kampüsü projesi için Trijenerasyon sisteminin uygulanabilirliği, seçilmesi gereken cihaz kapasiteleri ile sistemin teknik ve ekonomik yönden irdelenmesi sonucunda toplam maliyet ve ekonomik karlılık analizi yapılmıştır.

Hastanelerde çalışma saatleri ve kullanılan tıbbi cihazların sürekli olarak kullanılıp kullanılmamasına bağlı olarak elektrik tüketim eğrileri gün içinde saatlere göre değişmektedir. Türkiye’de mesai saatlerine bağlı olarak hastanelerde neredeyse tüm tıbbi cihazlar, asansörler ve elektrik enerjisi kullanan diğer donanımların tamamı 08:00–17:00 saatleri arasında çalışır durumda olmaktadır. Bunun yanında çalışmakta olan personel ve hasta sayısındaki yoğunluğun sonucu olarak aydınlatma amaçlı sistemler ve bilgisayarlar gibi diğer elektrikli aletlerin de tamamı bu zaman dilimi içinde çalışır halde olmaktadır (Çakır 2007).

Hastanelerdeki elektrik kullanımı yılın aylarına bağlı olarak da değişiklik arz etmektedir. Özellikle yaz aylarında ihtiyaç duyulan iklimlendirme uygulamaları modern hastanelerin çoğunda elektrik harcamalarının bu zaman diliminde artmasına neden olmaktadır.

Bu yüzden hastane binalarında gün içi ve mevsimsel etkilere bağlı olarak elektrik, soğutma ve ısıtma ihtiyaçlarının değişkenlik göstermesi; sistem kapasitesinin belirlenmesinde optimizasyon yapılmasını zorunlu kılmaktadır.

Sistem seçimi için optimizasyonda maksimize edilmesi hedeflenen üç temel kriter;

- Elektrik tüketiminin maksimum oranda karşılanması
- Soğutma ve ısıtma ihtiyacının maksimum oranda karşılanması
- Trijenerasyon sisteminin maksimum kapasitede çalışmasıdır.,

- Maksimizasyon için kısıtlar ise;
- Elektrik ve ısı tüketiminin mevsimsel ve günlük etkilerle değişiklik göstermesi
- Trijenerasyon ünitelerinin nominal güçlerinin belirli aralıklarla üretilmesidir.

Optimizasyonda göz önüne alınması gereken kriterler ise;

- Kış–Yaz ve Gece–Gündüz tüketim farklılıklarının dikkate alınması.
- Sistem elemanlarının kapasitesi belirlenirken elektrik ihtiyacının öncelikli ele alınması
- Kojenerasyon ünitelerinin nominal gücünün %40'ının altında çalışamayacağını dikkate alınması gerekir.

Sistem seçiminde hastanenin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin karşılanması öncelikli olarak referans alınması gereken datadır. Söz konusu elektrik enerjisi referans alındığı için seçilecek sistemin elektrik veriminin iyi olması gerekmektedir. Bu gerekçelerle, elektrik veriminin yüksek olması ve hastanenin elektrik talebinin sürekli dalgalı seyretmesi ile ani dalgalanmalara hemen cevap verilebilme için sistemde elektrik üretimi, doğalgazlı motorlar vasıtasıyla sağlanması uygun olacaktır. Hastanenin yıllık toplam elektrik ihtiyacının mümkün olduğu kadar fazlasının sistemle üretilmesi ve bu esnada oluşan ısı enerjisinin de ihtiyaç duyulan alanlarda etkili bir şekilde kullanılması ve yaz konumunda elde edilen atık ısıyı bir absorpsiyonlu çiller aracılığı ile soğutma enerjisi üretebilmesi için kullanılması hedeflenmektedir. Hastanenin ısıtma ve soğutma ihtiyacının tamamı trijenerasyon sistemi ile karşılanması mümkün değildir. Hastanenin ihtiyaç duyduğu ısıtma ve soğutma enerjisinin bir bölümü bu sistemle sağlanmaktadır. Bu yüzden hastane için ilave sıcak su kazanlarına ve kompresörlü soğutma sistemlerine ihtiyaç vardır.

Trijenerasyon sistemlerinde farklı yakıt kullanarak çalışan motorlar olmakla birlikte; yakıt maliyetinin ucuzluğu, kontrol mekanizmasının kolaylığı ve il bazında yaygınlaşmış kullanımının da bulunması sebebi ile doğalgaz yakıt olarak seçilmiştir.

03 Aralık 2010 tarihinde yayınlanan “Lisanssız Elektrik Üretme Yönetmeliği” ile sadece kendi ihtiyacını karşılamak üzere kojenerasyon sistemi kuran gerçek ve tüzel kişilere lisans alma ve şirket olma muafiyeti getirilmiştir. Böylece vakıfların, toplu konutların, kamu kuruluşlarının, küçük ve orta büyüklükte faaliyet gösteren tesislerin kojenerasyon sistemi kurmalarında kolaylıklar sağlanmıştır. Bu yönetmelik çerçevesine sadece hastanenin ihtiyaç duyduğu miktarda elektrik üretecek sistem tasarlanacak ve bu sistem için herhangi bir lisans alınmasına gerek kalmamaktadır.

Hastanenin yıl boyunca elektrik talebi Trijenerasyon sistemi ve mevcut dağıtım şebekesi ile sürekli olarak paralel çalışacak şekilde karşılanmalıdır. Bu yüzden şebeke ile uyumlu bir sistem tasarlanmalıdır.

Trijenerasyon sisteminin gaz motorlarının, gün içerisinde talep edilen elektrik ihtiyacının düşmesi ile çalışma yükü düşmektedir. Motor yükü %50’nin altına düşmesi sistem verimini oldukça kötü etkilemektedir. (Anonymous 2002) Motorların %50 altında bir yüklenme ile çalıştırılması halinde birim güç maliyeti çok fazla artmaktadır ve sistemin çalışma ömrü azalmaktadır. Dolayısıyla kullanılacak motor veya motorlarının %50 yükün altında çalışmasına izin verilmemelidir. Bu yüzden hastanenin değişen elektrik talebini en efektif şekilde karşılamak için sistemin gaz motorları en az iki adet olacak şekilde tasarlanmalıdır. Kas kat çalışan motorlar kendi aralarında hem de şebekeyle uyumlu şekilde çalışmalıdır. Pratikte motor kapasiteleri üretici firmalar tarafından standartlaştırılmıştır. Dolayısıyla düşünüldüğü gibi tam istenilen güçte bir motor temin edilemeyebilir. Böyle bir durumda gerekli gücün bir üst kapasitesindeki motor tercih edilir. Ani ve aşırı yüklenmelerde sistemin korunması için tüm yüklerde mutlaka ihtiyaç duyulan enerjinin bir kısmı şebekeden karşılanmalıdır.

Kampüs Hastanesi için planlanan sistem tasarımı proje aşamasında olduğu için çalışan bir hastanenin veri değerleri bu sistemin doğru bir şekilde detaylandırılması için önem arz etmektedir. Bu projenin yapılacağı alanın hemen yan tarafında hali hazırda hizmet veren 400 yatak kapasiteli Erzurum Bölge Eğitim ve Araştırma Hastanesi model olarak seçilmiştir.

Erzurum Bölge Eğitim ve Araştırma Hastanesinin saatlik veri olarak kaydettiği 2011 yılına ait Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül, Ekim, Kasım, Aralık ve 2012 yılına ait Ocak, Şubat, Mart, Nisan aylarına ait tüketilen elektrik enerji değeri alınmıştır. Hastanenin işletme şartlarıyla elde edilen mevsimlik, aylık, günlük ve saatlik olarak elektrik enerjisi ihtiyaçları belirlenmiştir. Günün saatleri, elektrik tarifiesi temel alınarak ayrılmış ve değerlendirme gündüz, puant ve gece tarifiesi üzerinden yapılmıştır. Ayrıca haftanın aktif günleri olan hafta içi ve daha pasif işletme şartlarının gerçekleştiği hafta sonu günlerinin elektrik tüketim değerleri de hassas bir seçim kriteri sağlanması için göz önüne alınmıştır. Bu veriler ışığında Erzurum Bölge Eğitim ve Araştırma Hastanesinin her ay için ortalama saatlik elektrik tüketim değerleri belirlenmiştir.

İnşa edilecek Kampüs Hastanesinin proje hesap raporlarında yer alan hastanenin kurulu gücü, ısıtma ve soğutma yükü değerleri, çalışan mevcuttaki hastanenin kurulu gücü, ısıtma ve soğutma yükü değerlerinin tam iki katı kadardır.

Bölge Eğitim ve Araştırma Hastanesi Elektrik Enerjisi İhtiyacı: kurulu gücü 6.400 kVA yaklaşık 5.112 kWe'dır. Kampüs Hastanenin Elektrik Enerjisi İhtiyacı: kurulu gücü 12.500 kVA yaklaşık 10.000 kWe'dır.

Bölge Eğitim ve Araştırma Hastanesi ısıtma ihtiyacı: 90/70°C çalışan ve 5 adet 2.150.000 kcal/h kapasitesine sahip sıcak su kazanları mevcuttur. Buda toplamda 12.500kWh'dır. Kampüs Hastanenin ısıtma sıcak su kazanları 90/70°C çalışan ve 4 adet 5.160.000 kcal/h kapasitesine sahiptir. Buda toplamda 24.000 kWh dir.

Bölge Eğitim ve Araştırma Hastanesi Soğutma Enerjisi İhtiyacı 8.500 kW, Kampüs Hastanenin Soğutma Kapasitesi ise 14.885.128 kcal/h (Projeden) = 17.311 kW'dır.

Kampüs Hastanesi için Trijenerasyon sistemi tasarımı için, yapının aylara göre saatlik talep edeceği elektrik enerjisi değişim değerleri, düzenlediğimiz Erzurum Bölge Eğitim ve Araştırma Hastanesinin tüketim değerlerinin yaklaşık iki katı olacağı tahminiyle hesaplanmıştır.

Hastanenin elektrik ihtiyacını maksimum seviyede karşılanması hedef alınmış, bu veriler ışığında kampus projesi için en uygun cihazın seçimi ve çalışma şartları belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılacak sistemde çalışacak sistem elemanlarının kapasiteleri gaz motorunun kapasitesi ile belirlenmektedir. Gaz motorlarının kapasitesi ise, çalışma yükünü maksimum seviyede tutarak günün saatine ve mevsimsel şartlara göre değişen binanın en yüksek ve en düşük elektrik talebini karşılayacak ölçüde olması ile belirlenir.

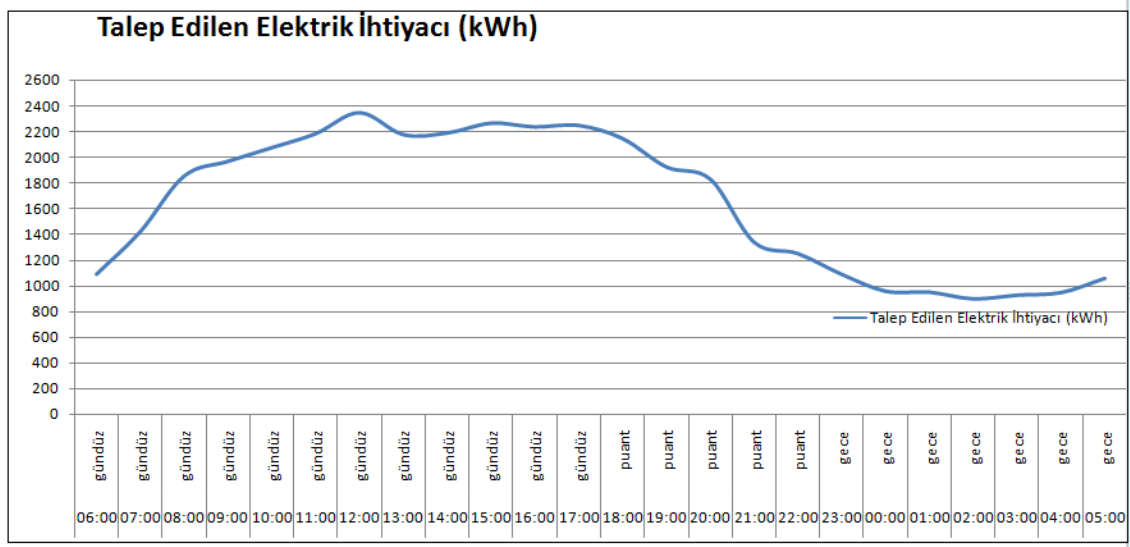
Erzurum için, Çizelge 3.1’de verilen Meteoroloji Genel Müdürlüğü resmi istatistik değerlerine göre mevsimsel en pik çalışma rejiminin, en düşük ve en yüksek sıcaklık değerlerine göre Ocak ve Ağustos aylarında olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.1. Erzurum için, meteoroloji genel müdürlüğü resmi istatistik değerleri

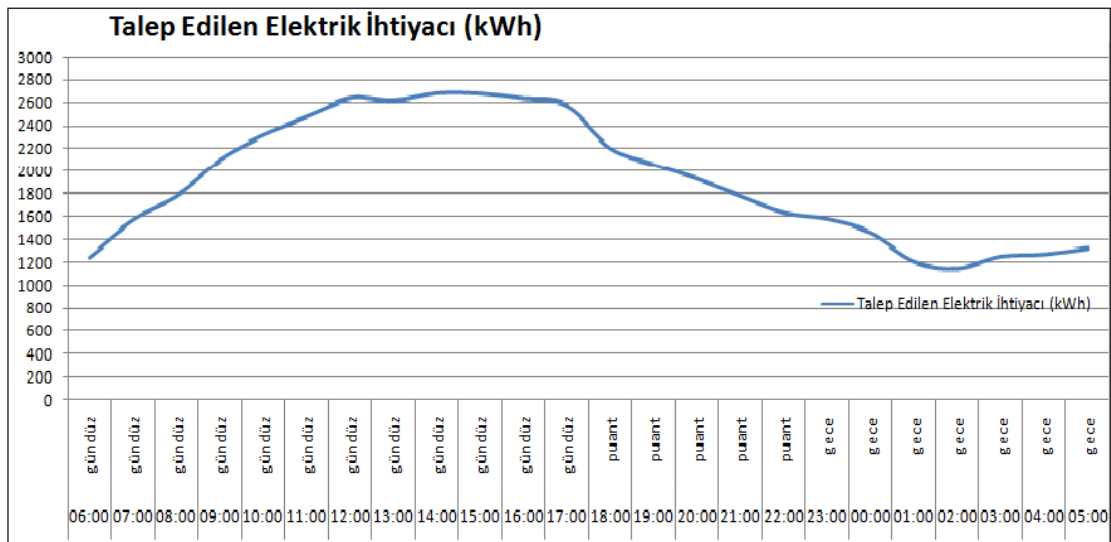
Erzurum	Ortalama Sıcaklık (°C)	Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)
Ocak	-9,9	-4,3	-15,2	3,6
Şubat	-8,2	-2,5	-13,6	3,5
Mart	-2,2	3,1	-7,1	4,5
Nisan	5,5	11,5	-0,1	6,0
Mayıs	10,4	16,9	3,7	7,5
Haziran	14,9	21,9	6,7	10,1
Temmuz	19,3	26,9	10,6	11,1
Ağustos	19,3	27,4	10,4	10,4
Eylül	14,4	23,1	5,5	8,6
Ekim	7,8	15,4	1,0	6,3
Kasım	0,1	6,3	-5,1	4,3
Aralık	-6,6	-1,4	-11,5	2,5

Ocak ve Ağustos aylarında Erzurum Bölge Eğitim ve Araştırma hastanesi için düzenlediğimiz elektrik tüketim değerlerinde de, yapının talep ettiği elektrik enerjisi en pik seviyede olduğu görülmektedir. Ocak ayında binanın ısıtması Ağustos ayında ise soğutulmasında elektrik enerjisine olan ihtiyaçtan dolayı tüketim değeri artmaktadır. Geçiş dönemi olan Nisan ayında ise tüketim değerleri en düşük seviyededir.

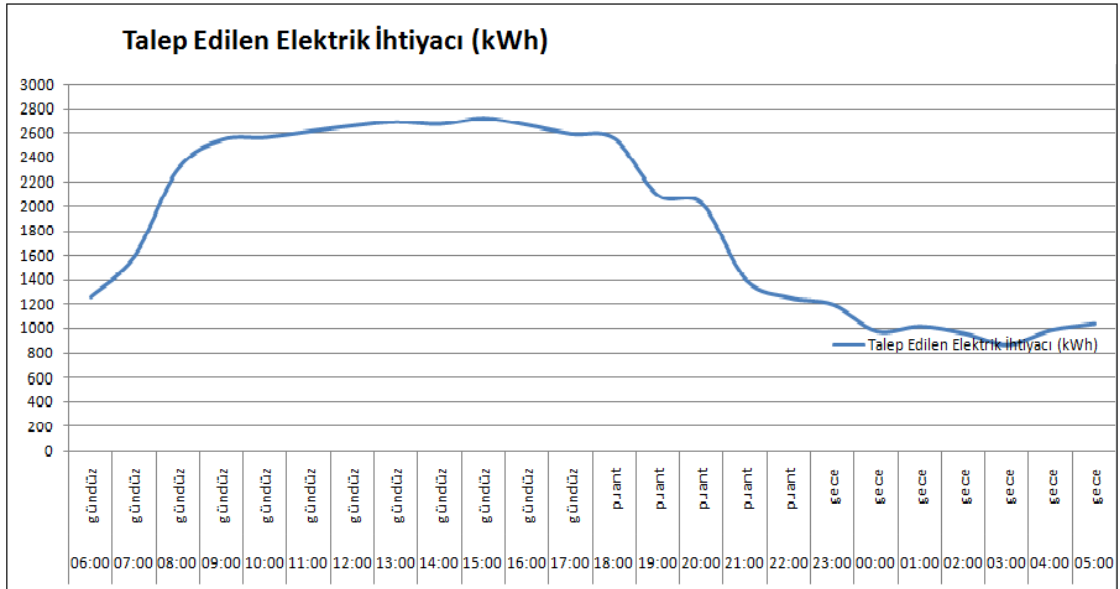
Erzurum Bölge Eğitim ve Araştırma Hastanesi Elektrik tüketim verilerine göre düzenlediğimiz, Kampüs Hastanesinin aylara göre ortalama saatlik elektrik enerjisi tüketim verilerinde, en düşük elektrik tüketimin olduğu Nisan Ayına ait ve en yüksek elektrik tüketim değerlerinin olduğu Ocak ve Ağustos Aylarına ait saatlik tahmini elektrik tüketim değerleri Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de verilmektedir.



Şekil 3.1. En düşük elektrik tüketiminin olduğu Nisan ayı saatlik elektrik tüketim değeri



Şekil 3.2. Yüksek elektrik tüketiminin olduğu Ocak ayı saatlik elektrik tüketim değeri



Şekil 3.3. En yüksek elektrik tüketiminin olduğu Ağustos ayı saatlik elektrik tüketim değeri

Bu tüketim eğrilerinden hastanenin saatlik elektrik enerjisi talebindeki minimum değer Nisan ayı içerisinde saat 02:00'de 896 kWh olduğu ve maksimum değerin ise Ağustos ayında saat 13:00'de 2695 kWh olduğu görülmüştür.

Hastanenin saatlik olarak talep ettiği dalgalı elektrik ihtiyacını en efektif şekilde karşılanabilmesi için sistem iki adet kas kat çalışabilecek ve tam yükte her bir motorun elektrik çıktısının 1264 kWe olacağı bir sitemle tasarlanmıştır. Şekil 3.4'de teknik özellikleri verilen GE Jenbacher gaz motorlarına ait doğal gaz yakıtlı JMS 420 GS-N.L motorları sistem için uygun görülmüştür.

Üretim		GE Jenbacher
Motor tipi		J 420 GS-B309
Çalışma prensibi		4 - Zamanlı
Konfigürasyon		V 70 ⁰
Silindir sayısı		20
Çap	mm	145
Strok	mm	185
Piston süpürme hacmi	lit	61,10
Nominal hız	rpm	1.500
Ortalama piston hızı	m/s	9,25
Uzunluk	mm	3.750
Genişlik	mm	1.580
Yükseklik	mm	2.033
Boş ağırlık	Kg	6.600
Dolu ağırlık	Kg	7.300

Şekil 3.4. Sistemde kullanılacak her bir motorun teknik özellikleri.

Buna göre bu motorların Ocak, Nisan, Ağustos aylarında hastanenin talep ettiği elektrik ihtiyacını karşılamak için çalışacakları motor yük değerleri Çizelge 3.2, Çizelge.3.3 ve Çizelge 3.4’de verilmektedir.

Çizelge 3.2. Ocak ayı için hastanenin talep ettiği elektrik ihtiyacını karşılayacak motorların saatlik çalışma yükleri

Saatler	Tarife	Talep Edilen Elektrik İhtiyacı (kWh)	Çalışan Motorların Yük Oranı		Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	Şebekeden Alınan Elektrik Enerjisi (kWh)
			I.Motor %	II.Motor %		
06:00	gündüz	1245,85	0%	98%	1245,85	0
07:00	gündüz	1578,32	100%	0%	1264	314,32
08:00	gündüz	1785,86	70%	70%	1785,86	0
09:00	gündüz	2105,66	83%	83%	2105,66	0
10:00	gündüz	2328,59	92%	92%	2328,59	0
11:00	gündüz	2487,87	98%	98%	2487,87	0
12:00	gündüz	2644,21	100%	100%	2528	116,21
13:00	gündüz	2622,21	100%	100%	2528	94,21
14:00	gündüz	2685,45	100%	100%	2528	157,45
15:00	gündüz	2682,98	100%	100%	2528	154,98
16:00	gündüz	2639,99	100%	100%	2528	111,99
17:00	gündüz	2585,61	100%	100%	2528	57,61

Çizelge 3.2 (devam)

Saatler	Tarife	Talep Edilen Elektrik İhtiyacı (kWh)	Çalışan Motorların Yük Oranı		Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	Şebekeden Alınan Elektrik Enerjisi (kWh)
			I.Motor %	II.Motor %		
18:00	puant	2210,12	87%	87%	2210,12	0
19:00	puant	2067,83	81%	81%	2067,83	0
20:00	puant	1939,57	76%	76%	1939,57	0
21:00	puant	1786,96	70%	70%	1786,96	0
22:00	puant	1640,27	65%	65%	1640,27	0
23:00	gece	1584,17	0%	100%	1264	320,17
00:00	gece	1465,47	100%	0%	1264	201,47
01:00	gece	1206,73	0%	95%	1206,73	0
02:00	gece	1149,18	91%	0%	1149,18	0
03:00	gece	1256,41	0%	100%	1256,41	0
04:00	gece	1275,35	100%	0%	1264	11,35
05:00	gece	1328,74	0%	100%	1264	64,74

Çizelge 3.3. Nisan ayı için hastanenin talep ettiği elektrik ihtiyacını karşılayacak motorların saatlik çalışma yükleri

Saatler	Tarife	Talep Edilen Elektrik İhtiyacı (kWh)	Çalışan Motorların Yük Oranı		Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	Şebekeden Alınan Elektrik Enerjisi (kWh)
			I.Motor %	II.Motor %		
06:00	gündüz	1089,12	0%	86%	1089,12	0
07:00	gündüz	1421,45	100%	0%	1264	157,45
08:00	gündüz	1854,56	73%	73%	1854,56	0
09:00	gündüz	1968,75	78%	78%	1968,75	0
10:00	gündüz	2075,48	82%	82%	2075,48	0
11:00	gündüz	2184,36	86%	86%	2184,36	0
12:00	gündüz	2348,15	93%	93%	2348,15	0
13:00	gündüz	2176,18	86%	86%	2176,18	0
14:00	gündüz	2189,54	86%	86%	2189,54	0
15:00	gündüz	2265,45	89%	89%	2265,45	0
16:00	gündüz	2237,14	88%	88%	2237,14	0

Çizelge 3.2 (devam)

Saatler	Tarife	Talep Edilen Elektrik İhtiyacı (kWh)	Çalışan Motorların Yük Oranı		Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	Şebekeden Alınan Elektrik Enerjisi (kWh)
			I.Motor %	II.Motor %		
17:00	gündüz	2248,34	89%	89%	2248,34	0
18:00	puant	2145,79	85%	85%	2145,79	0
19:00	puant	1924,36	76%	76%	1924,36	0
20:00	puant	1829,37	72%	72%	1829,37	0
21:00	puant	1337,89	100%	0%	1264	73,89
22:00	puant	1248,97	0%	99%	1248,97	0
23:00	gece	1087,56	86%	0%	1087,56	0
00:00	gece	956,23	75%	0%	956,23	0
01:00	gece	948,71	0%	75%	948,71	0
02:00	gece	896,64	70%	0%	896,64	0
03:00	gece	925,14	0%	73%	925,14	0
04:00	gece	945,25	74%	0%	945,25	0
05:00	gece	1056,34	0%	83%	1056,34	0

Çizelge 3.4. Ağustos ayı için hastanenin talep ettiği elektrik ihtiyacını karşılayacak motorların saatlik çalışma yükleri

Saatler	Tarife	Talep Edilen Elektrik İhtiyacı (kWh)	Çalışan Motorların Yük Oranı		Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	Şebekeden Alınan Elektrik Enerjisi (kWh)
			I.Motor %	II.Motor %		
06:00	gündüz	1258,3	0%	100%	2308,74	0
07:00	gündüz	1594,1	100%	0%	2528	14,94
08:00	gündüz	2308,74	91%	91%	2528	33,9
09:00	gündüz	2542,94	100%	100%	2528	84,51
10:00	gündüz	2561,9	100%	100%	2528	132,78
11:00	gündüz	2612,51	100%	100%	2528	167,67
12:00	gündüz	2660,78	100%	100%	2528	148,12
13:00	gündüz	2695,67	100%	100%	2528	196,13
14:00	gündüz	2676,12	100%	100%	2528	139,29
15:00	gündüz	2724,13	100%	100%	2528	63,57

Çizelge 3.2 (devam)

Saatler	Tarife	Talep Edilen Elektrik İhtiyacı (kWh)	Çalışan Motorların Yük Oranı		Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	Şebekeden Alınan Elektrik Enerjisi (kWh)
			I.Motor %	II.Motor %		
16:00	gündüz	2667,29	100%	100%	2528	23,84
17:00	gündüz	2591,57	100%	100%	2088,51	0
18:00	puant	2551,84	100%	100%	2019,51	0
19:00	puant	2088,51	83%	83%	1264	136,81
20:00	puant	2019,51	80%	80%	1253,03	0
21:00	puant	1400,81	100%	0%	1195,95	0
22:00	puant	1253,03	0%	99%	975,4	0
23:00	gece	1195,95	94%	0%	1016,53	0
00:00	gece	975,4	77%	0%	958,69	0
01:00	gece	1016,53	0%	80%	865,5	0
02:00	gece	958,69	76%	0%	985,1	0
03:00	gece	865,5	0%	68%	1038,45	0
04:00	gece	985,1	78%	0%	2308,74	0
05:00	gece	1038,45	0%	82%	2528	14,94

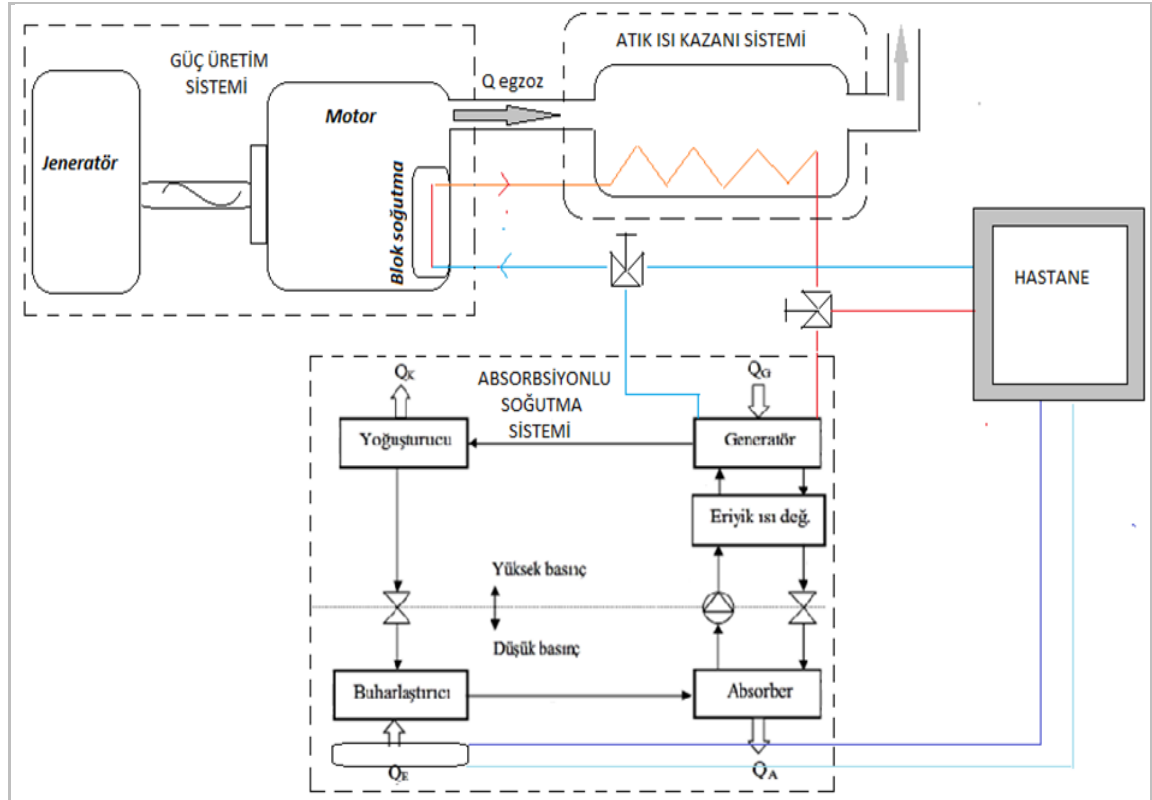
Çizelgelerde görüldüğü gibi mevsimsel ve gün içerisinde değişen elektrik ihtiyacını seçilen gaz motorlarının karşılamak için çalışma yükleri uygun değerlerde ve şebekeden ihtiyaç duyulan elektrik miktarı ise minimum seviyededir. Kampus Hastanesi için Trijenerasyon Sistemi bu gaz motorları göz önüne alınarak tasarlanacak ve sistem teknik ve ekonomik yönden incelenecektir.

3.1. Sistemin Teknik Açidan İncelenmesi

Şekil 3.5.'de şematik resmi verilen sistemde, Kampüs hastanesinin tahmin edilen saatlik elektrik enerji ihtiyacındaki değişimi karşılamak için değişecek motor yüküne göre sistemi oluşturan üç ana ekipmanın matematiksel modeli oluşturulmuştur.

1. Doğal gaz yakıtı kullanarak çalışan sabit devirli motor.

2. Motorun egzoz gazlarından ve motor bloğundan alınan ısı enerjisini değerlendireceğimiz atık ısı kazanı.
3. Atık ısı kazanındaki ısı enerjisini soğutma enerjisine çeviren tek etkili LiBr Çözeltili ile çalışan absorpsiyonlu soğutma sistemi.



Şekil 3.5. Sistemin şematik resmi

3.1.1. Motorun matematiksel modelinin oluşturulması

Trijenerasyon sistemi için kullanılacak gaz yakıtlı motor içten yanmalı ve prensipte oto çevrime göre çalışan doğal gaz yakıtlı motordur. Sabit devirli elektrik dalgalanmasında istenen gücü yüklemeyi değiştirerek sağlayan 20 silindirli V tipi bir motordur.

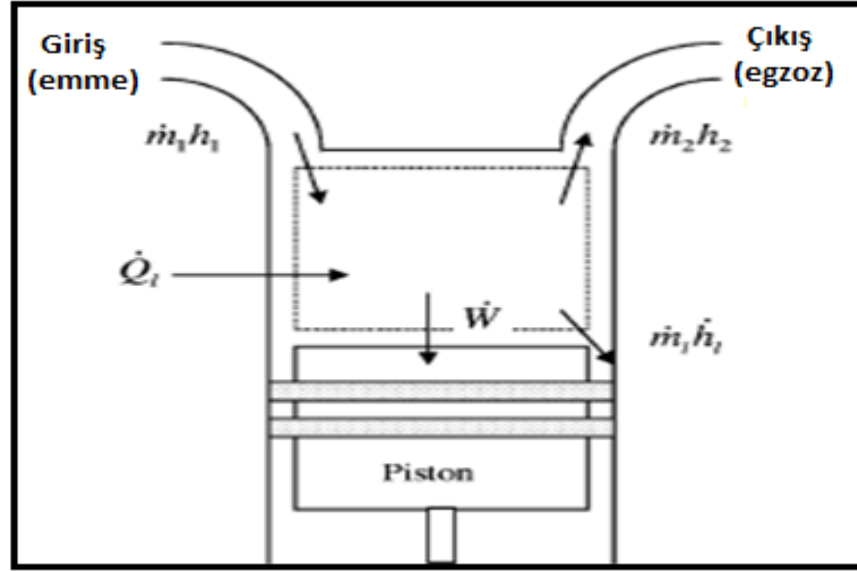
Motorun modellenmesi için yanmış-yanmamış gaz modeline sahip boyutsuz iki alanlı termodinamik simülasyon hazırlanmıştır. Bu simülasyon temelde Ferguson (1986)

tarafından yapılan simülasyona dayanmaktadır. Bu model silindir basıncı, ısı kaybı, egzoz gaz sıcaklığı, kütle akış oranını tahmin etmek için geliştirilmiştir.

Model, yakıt yanma oranı ve krank açısı arasında ampirik ifadeler bulundurmakta ve termodinamiğin birinci yasasına dayandırılmaktadır. İki alanlı yanma modelinde herhangi bir yanma zamanı için silindir hacmi, alev cephesi ile yanmış ve yanmamış bölgelere ayrılmaktadır. Termodinamik analizlerde aşağıdaki kabuller dikkate alınmıştır.

- Her iki alan termodinamik denge durumundadır.
- Her iki alanın basınçları eşittir ve silindir içerisinde basınç uniformdur.
- Her iki alanda yoğunluk, sıcaklık veya kompozisyon gradyeni yoktur.
- Yanma ürünlerinin özgül ısıları sıcaklığın fonksiyonu olarak değişmektedir.
- Yanma ürünleri bileşimi hesaplanırken 1700K altındaki sıcaklıklarda sabit (frozen); üzerindeki sıcaklıklarda kimyasal dengededir.
- Emme ve Egzoz periyotlarında basınç sabittir.
- Isı transferi hesaplamaları Woschni tarafından önerilen bağıntılar ile yapılmıştır.

Çalışmada Şekil 3.6'da şematik olarak gösterilen yanma odası kontrol hacmi olarak alınmıştır. Temel denklemler kütle ve enerji dönüşüm denklemleri ile hal denklemleridir. Kullanılacak denklemler için bağımsız değişken krank açısıdır.



Şekil 3.6. Açık termodinamik sistem olarak yanma bölgesinin şeması

Kütle ve Enerji Korunumu: Gaz ve hava karışımı içeren açık sistem için kontrol hacmi içerisindeki toplam kütle değişim hızı, sisteme ve/veya sistemden olan kütle akışının toplamıdır.

$$\frac{dm_{k.h.}}{dt} = \sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_\zeta \quad 3.1$$

Açık sistem için Termodinamiğin Birinci Yasası yazılırsa aşağıdaki enerji denklemi elde edilir:

$$\dot{Q}_{k.h.} - \dot{W}_{k.h.} = \sum \dot{m}_\zeta \left(h_\zeta + \frac{v_\zeta^2}{2} + gz_\zeta \right) + \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{v_g^2}{2} + gz_g \right) + \frac{dE_{k.h.}}{dt} \quad 3.2$$

Kütle dönüşümü ve enerji denklemleri krank açısının fonksiyonu olarak yazılır ve kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilirse, 3.1 ve 3.2 denklemlerden 3.3 ve 3.4 numaralı denklemler elde edilir.

$$\frac{dm_{k.h.}}{d\theta} = \sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_\zeta \quad 3.3$$

$$\frac{d(mu)}{d\theta} = \frac{dQ}{d\theta} - P \frac{dV}{d\theta} + \sum_j h_j \frac{dm_j}{d\theta} \quad 3.4$$

Termodinamik Özellikler: İki alanlı modelde yanmış ve yanmamış karışım ayrı ayrı açık sistem olarak kabul edilirse özgül iç enerji ve özgül hacim aşağıdaki şekilde ifade edilir. Burada x = yakıtın yanmış miktarının oranıdır.

$$u = \frac{U}{m} = xu_b + (1 - x)u_U \quad 3.5$$

$$v = \frac{V}{m} = xv_b + (1 - x)v_U \quad 3.6$$

Yanmış ve yanmamış gazların basınçlarının eşit kabul edileceği belirtilmişti, bu durumda V_b ve V_u değerleri T_b , T_u ve P 'nin fonksiyonları olacaktır:

$$\frac{dV_b}{d\theta} = \frac{\partial V_b}{\partial T_b} \frac{dT_b}{d\theta} + \frac{\partial V_b}{\partial P} \frac{dP}{d\theta} \quad 3.7$$

$$\frac{dV_U}{d\theta} = \frac{\partial V_U}{\partial T_U} \frac{dT_U}{d\theta} + \frac{\partial V_U}{\partial P} \frac{dP}{d\theta} \quad 3.8$$

Olikara ve Borman (1975) metodu kullanılarak logaritmik türevler yerine yazılırsa denklem aşağıdaki şekile dönüşür.

$$\frac{dV_b}{d\theta} = \frac{V_b}{T_b} \frac{\partial \ln V_b}{\partial \ln T_b} \frac{dT_b}{d\theta} + \frac{V_b}{P} \frac{\partial \ln V_b}{\partial \ln P} \frac{dP}{d\theta} \quad 3.9$$

$$\frac{dV_U}{d\theta} = \frac{V_U}{T_U} \frac{\partial \ln V_U}{\partial \ln T_U} \frac{dT_U}{d\theta} + \frac{V_U}{P} \frac{\partial \ln V_U}{\partial \ln P} \frac{dP}{d\theta} \quad 3.10$$

Söz konusu metot termodinamik analizlerde spesifik ısıların, iç enerjilerin, entalpilerin, entropilerin, kimyasal denge bileşimlerini çözümlmek için denge sabitlerine dayandırılan bir metottur.

Bu denklemlerle Olikara ve Borman'ın amacı yanmış ve yanmamış gazların hacminin krank açısıyla değişimini hesaplamaktır.

Aynı şekilde özgül iç enerjiler de yazılırsa aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$\frac{du_b}{d\theta} = \frac{\partial u_b}{\partial T_b} \frac{dT_b}{d\theta} + \frac{\partial u_b}{\partial P} \frac{dP}{d\theta} \quad 3.11$$

$$\frac{du_U}{d\theta} = \frac{\partial u_U}{\partial T_U} \frac{dT_U}{d\theta} + \frac{\partial u_U}{\partial P} \frac{dP}{d\theta} \quad 3.12$$

Logaritmik terimler ilave edilirse:

$$\frac{du_b}{d\theta} = \left[c_{pb} - \frac{PV_b}{T_b} \frac{\partial \ln V_b}{\partial \ln T_b} \right] \frac{dT_b}{d\theta} - V_b \left[\frac{\partial \ln V_b}{\partial \ln T_b} + \frac{\partial \ln V_b}{\partial \ln P} \right] \frac{dP}{d\theta} \quad 3.13$$

$$\frac{du_U}{d\theta} = \left[c_{pU} - \frac{PV_U}{T_U} \frac{\partial \ln V_U}{\partial \ln T_U} \right] \frac{dT_U}{d\theta} - V_U \left[\frac{\partial \ln V_U}{\partial \ln T_U} + \frac{\partial \ln V_U}{\partial \ln P} \right] \frac{dP}{d\theta} \quad 3.14$$

Burada $u=u(P,T)$ ve $v=v(P,T)$ olduğu için u ve v 'nin P ve T 'ye göre kısmi türevleri yazılmıştır. Bu işlem sırasında her durum için bu değişkenler sabit kabul edilir.

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = \frac{(\partial V)_P}{(\partial T)_P} = \frac{V(\partial \ln V)_P}{T(\partial \ln T)_P} = \frac{V}{T} \left(\frac{\partial \ln V}{\partial \ln T} \right)_P \quad 3.15$$

benzer şekilde;

$$\left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T = \frac{(\partial V)_T}{(\partial P)_T} = \frac{V(\partial \ln V)_T}{P(\partial \ln P)_T} = \frac{V}{P} \left(\frac{\partial \ln V}{\partial \ln P} \right)_T \quad 3.16$$

İfadesine ulaşılır. $\left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_P$ ifadesini türetmek için $dq=du+pdv$ birinci kanun ifadesinden yola çıkılır,

$$(\partial U)_P = (\partial q)_P - P(\partial V)_P = c_P(\partial T)_P - P(\partial V)_P \quad 3.17$$

ardından,

$$\frac{(\partial U)_P}{(\partial T)_P} = c_P - P \frac{(\partial V)_P}{(\partial T)_P} = c_P - P \frac{V(\partial \ln V)_P}{T(\partial \ln T)_P} \quad 3.18$$

veya,

$$\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_P = c_P - \frac{PV}{T} \left(\frac{\partial \ln V}{\partial \ln T}\right)_P \quad 3.19$$

elde edilir.

$\left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_T$ ifadesini türetmek için ise,

$$du = Tds - pdv \quad 3.20$$

ifadesinden yola çıkılarak,

$$(\partial U)_T = T(\partial s)_T - P(\partial V)_T \quad 3.21$$

$$\frac{(\partial U)_T}{(\partial P)_T} = T \frac{(\partial s)_T}{(\partial P)_T} - P \frac{(\partial V)_T}{(\partial P)_T} \quad 3.22$$

Ayrıca,

$$\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = - \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \quad 3.23$$

ifadesi bilindiğine göre,

$$\left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_T = -T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P - P \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_P = V \left(\frac{\partial \ln V}{\partial \ln T} + \frac{\partial \ln V}{\partial \ln P}\right) \quad 3.24$$

İfadesine ulaşılır (Lewis 1961).

Kontrol Hacmindeki Kütle: Çeşitli periyotlarda kontrol hacmindeki kütle aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$m = \frac{V(\theta)}{V_U}: \text{Emme periyodu} \quad 3.25.a$$

$$m = m_{ESK} \exp[-I(\theta - \theta_{ESK})/W]: \text{Sıkıştırma, yanma ve genişleme periyodu} \quad 3.25.b$$

$$m = \frac{V(\theta)}{V_b}: \text{Blowdown ve egzoz periyodu} \quad 3.25.c$$

Herhangi bir krank açısındaki silindir hacmi şu ifadeyle verilmektedir:

$$V(\theta) = \frac{1}{2} S \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \left[\frac{2}{C-1} + 1 - \cos\theta + \frac{R}{4L} (1 - \cos 2\theta)\right] \quad 3.26$$

hacim ifadesi krank mili açısıyla integre edilirse şu ifadeye ulaşılır:

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{1}{2} S \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \left[\sin\theta + \frac{R}{2L} \sin 2\theta\right] \quad 3.27$$

Yakıt Yanma Oranı: Kıvılcım ateşlemeli motorlarda yakıtın kütleli yanma oranı Wiebe fonksiyonu ile ifade edilmektedir (Stone 1993):

$$x(\theta) = 1 - \exp \left[-a \left(\frac{\theta - \theta_a}{\theta_y} \right)^{n+1} \right] \quad 3.28$$

Yanma oranının krank mili açısı ile değişim hızı ise:

$$\frac{dx}{d\theta} = a \frac{(n+1)}{\theta_y} \left[-a \left(\frac{\theta - \theta_a}{\theta_y} \right)^n \right] \exp \left[-a \left(\frac{\theta - \theta_a}{\theta_y} \right)^{n+1} \right] \quad 3.29$$

Burada; θ_a , ateşleme avans açısı; θ_y , toplam yanma açısı; a , verim parametresi ve n ise şekil faktörüdür. Bu iki parametrenin alacağı değerler her yanma odası için değişiklik göstermekte ancak genelde $a=2$ ve $n=5$ kabul edilmektedir.

Isı Transferi: İçten yanmalı motorlarda, yakıtın silindir içerisinde yakılması sonucu üretilen ısı enerjisinin bir bölümü, motor elemanlarının soğutulması amacıyla soğutucu bir akışkan tarafından dışarı alınmaktadır. Eichelberg, Annand ve Woschni gibi araştırmacılar tarafından, içten yanmalı motorlarda ısı transfer katsayısının sıcaklıkla değiştiği belirtilmiş ve birbirlerine yakın sonuçlar veren bağıntılar önerilmiştir (Benson and Whitehouse 1979; Özaktaş 1989).

Silindir içerisindeki gazların sıcaklıkları krank mili açısına bağlı olarak değiştiğinden, ısı transfer katsayısı da krank mili açısına ve motorun devir sayısına bağlı olarak değişmektedir. Bundan dolayı tüm bu araştırmacılar denklemlerinde sıcaklık ve ortalama piston hızı terimlerini kullanmışlardır.

Termodinamik sisteme olan ısı transferi şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{-\dot{Q}}{w} = \frac{-\dot{Q}_b - \dot{Q}_U}{w} \quad 3.30$$

Burada,

$$\dot{Q}_b = KA_b(T_b - T_w) \quad 3.31$$

$$\dot{Q}_U = KA_U(T_U - T_w) \quad 3.32$$

ve

$$A_b = \left(\frac{\pi D^2}{2} + \frac{4V}{D} \right) (1 - x^{1/2}) \quad 3.33$$

$$A_U = \left(\frac{\pi D^2}{2} + \frac{4V}{D} \right) (1 - x^{1/2}) \quad 3.34$$

A_b ve A_U ; T_w sıcaklığındaki silindir duvarları ile temas halinde olan yanmış ve yanmamış gazların temas alanlarıdır. Woschni (1967) tarafından önerilen ısı transfer katsayısı ise;

$$K = 0,82D^{-0.2}(P \cdot 10^{-3} \cdot c)^{0.8}T^{-0.53} \quad 3.35$$

İfadesi ile bulunur. Burada;

$$c = 6.18V_p \text{ (emme ve egzoz periyotları)} \quad 3.36$$

$$c = 2.28V_p + 0.00324T \frac{\Delta P}{P_{ESK}} \frac{V}{V_{ESK}} \text{ (diğer periyotlar)} \quad 3.37$$

$$T = xT_b + (1 - x)T_U \quad 3.38$$

V_p , ortalama piston hızıdır ve $V_p = 2Ln$ ifadesi ile hesaplanır.

Çevrim Denklemlerinin Türetilmesi ve Çözüm Yöntemi:

3.6'da verilen denklem ile özgül hacim ifadesinin diferansiyeli alınıp 3.9'da verilen denklemde yerine yazılırsa şu ifade elde edilir:

$$\frac{1}{m} \frac{dV}{d\theta} - \frac{V}{m^2} \frac{dm}{d\theta} = x \frac{dV_b}{d\theta} + (1 - x) \frac{dV_U}{d\theta} + (V_b V_U) \frac{dx}{d\theta} \quad 3.39$$

$$\frac{1}{m} \frac{dV}{d\theta} + \frac{VI}{mw} =$$

$$x \frac{V_b}{T_b} \frac{\partial \ln V_b}{\partial \ln T_b} \frac{dT_b}{d\theta} + (1-x) \frac{V_U}{T_U} \frac{\partial \ln V_U}{\partial \ln T_U} \frac{dT_U}{d\theta} + \left[x \frac{V_b}{P} \frac{\partial \ln V_b}{\partial \ln P} + (1-x) \frac{V_U}{P} \frac{\partial \ln V_U}{\partial \ln P} \right] \frac{dP}{d\theta} + (V_b - V_U) \frac{dx}{d\theta}$$

3.40

Burada I katsayısı, blowbykatsayısıdır ve hesaplamalarımızda 0,92 alınmıştır.

Yanmış ve yanmamış gazların ısı kayıpları özgül entropi değişim hızının fonksiyonu olarak yazılırsa:

$$-\dot{Q}_b = mw x T_b \frac{ds_b}{d\theta} \quad 3.41$$

$$-\dot{Q}_U = mw (1-x) T_U \frac{ds_U}{d\theta} \quad 3.42$$

Burada,

$$\frac{ds_b}{d\theta} = \left(\frac{\partial s_b}{\partial T_b} \right) \frac{dT_b}{d\theta} + \left(\frac{\partial s_b}{\partial P} \right) \frac{dP}{d\theta} \quad 3.43$$

$$\frac{ds_b}{d\theta} = \left[\frac{c_{pb}}{T_b} \frac{dT_b}{d\theta} - \frac{V_b}{T_b} \frac{\partial \ln V_b}{\partial \ln T_b} \frac{dP}{d\theta} \right] \quad 3.44$$

$$\frac{ds_U}{d\theta} = \left(\frac{\partial s_U}{\partial T_U} \right) \frac{dT_U}{d\theta} + \left(\frac{\partial s_U}{\partial P} \right) \frac{dP}{d\theta} \quad 3.45$$

$$\frac{ds_U}{d\theta} = \left[\frac{c_{pU}}{T_U} \frac{dT_U}{d\theta} - \frac{V_U}{T_U} \frac{\partial \ln V_U}{\partial \ln T_U} \frac{dP}{d\theta} \right] \quad 3.46$$

3.44ve 3.46 denklemleri sırasıyla 3.41 ve 3.42 denklemlerin de yerine yazılarak,

$\frac{ds_b}{d\theta}, \frac{ds_U}{d\theta}$ terimleri ifadelerden çıkarılırsa;

$$c_{pb} \frac{dT_b}{d\theta} - V_b \frac{\partial \ln V_b}{\partial \ln T_b} \frac{dP}{d\theta} = \frac{-K \left[\frac{\pi D^2}{2} + \frac{4V}{D} \right] x^{\frac{1}{2}}}{wm} (T_b - T_w) \quad 3.47$$

$$c_{pU} \frac{dT_U}{d\theta} - V_U \frac{\partial \ln V_U}{\partial \ln T_U} \frac{dP}{d\theta} = \frac{-K \left[\frac{\pi D^2}{2} + \frac{4V}{D} \right] \left(1 - x^{\frac{1}{2}} \right)}{wm} (T_U - T_w) \quad 3.48$$

3.4, 3.39, 3.40 ve 3.47, 3.48 nolu denklemler bir araya getirilirse aşağıdaki parametreler elde edilir.

$$A = \frac{1}{m} \left(\frac{dV}{d\theta} + \frac{VI}{w} \right) \quad 3.49$$

$$B = \frac{K \left[\frac{\pi D^2}{2} + \frac{4V}{D} \right]}{wm} \left[\frac{V_b}{c_{pb}} \frac{\partial \ln V_b}{\partial \ln T_b} x^{\frac{1}{2}} \frac{T_b - T_w}{T_b} + \frac{V_U}{c_{pU}} \frac{\partial \ln V_U}{\partial \ln T_U} \left(1 - x^{\frac{1}{2}} \right) \frac{T_U - T_w}{T_U} \right] \quad 3.50$$

$$C = -(V_b - V_U) \frac{dx}{d\theta} - V_b \frac{\partial \ln V_b}{\partial \ln T_b} \frac{h_U - h_b}{c_{pb} T_b} \left[\frac{dx}{d\theta} - \frac{(x - x^2)I}{w} \right] \quad 3.51$$

$$D = x \left[\frac{V_b^2}{c_{pb} T_b} \left(\frac{\partial \ln V_b}{\partial \ln T_b} \right)^2 + \frac{V_b}{P} \frac{\partial \ln V_b}{\partial \ln P} \right] \quad 3.52$$

$$E = (1 - x) \left[\frac{V_U^2}{c_{pU} T_U} \left(\frac{\partial \ln V_U}{\partial \ln T_U} \right)^2 + \frac{V_U}{P} \frac{\partial \ln V_U}{\partial \ln P} \right] \quad 3.53$$

ve bu denklemlerden faydalanılarak aşağıdaki beş denkleme ulaşır:

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{A+B+C}{D+E} \quad 3.54$$

$$\frac{dT_b}{d\theta} = \frac{-K \left[\frac{\pi D^2}{2} + \frac{4V}{D} \right] x^{\frac{1}{2}} (T_b - T_w)}{wm c_{pb} x} + \frac{V_b}{c_{pb}} \frac{\partial \ln V_b}{\partial \ln T_b} \left(\frac{A+B+C}{D+E} \right) \frac{h_U - h_b}{x c_{pb}} \left[\frac{dx}{d\theta} - (x - x^2) \frac{I}{w} \right] \quad 3.55$$

$$\frac{dT_U}{d\theta} = \frac{-K\left[\frac{\pi D^2}{2} + \frac{4V}{D}\right]\left(1-x^2\right)(T_U-T_w)}{wmc_{pb}(1-x)} + \frac{V_U}{c_{pU}} \frac{\partial \ln V_U}{\partial \ln T_U} \left(\frac{A+B+C}{D+E}\right) \quad 3.56$$

$$\frac{dW}{d\theta} = P \frac{dV}{d\theta} \quad 3.57$$

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{K}{w} \left[\frac{\pi D^2}{2} + \frac{4V}{D}\right] \left[x^2(T_b - T_w) + \left(1 - x^2\right)(T_U - T_w)\right] \quad 3.58$$

Bu denklemler θ, P, T_b, T_u 'nin fonksiyonlarıdır. Onların nümerik birleşimi 5. dereceden Runge-kutta metodu kullanılarak elde edile bilmektedir. Bu denklemler çözüldüğü taktirde modelimiz çalışacaktır. Bir motor turu içinde farklı süreçler için uygulanan yukarıda listelenen denklemlerin uygulamaları Çizelge 3.5'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.5. Bir motor turunda emme, sıkıştırma, iş, genişleme ve egzoz zamanı için motor modelinde kullanılacak denklem takımlarının uygulamaları

	Emme zamanı - $360^0 \leq \theta < \theta_{TVC}$	Sıkıştırma zamanı $\theta_{TVC} \leq \theta < \theta_{ig}$	İş zamanı $\theta_{ig} \leq \theta < \theta_{ig} + \theta_b$	Genişleme zamanı $\theta_{ig} + \theta_b \leq \theta < \theta_{EVO}$	Egzoz zamanı - $180 \leq \theta < 360^0$
$\frac{dP}{d\theta}$	0	Denklem 54	Denklem 54	Denklem 54	0
$\frac{dT_b}{d\theta}$	Gerek yok	Gerek yok	Denklem 55	Denklem 55	Denklem 55
$\frac{dT_U}{d\theta}$	Denklem 54	Denklem 56	Denklem 56	Gerek yok	Gerek yok
A	Gerek yok	Denklem 49	Denklem 49	Denklem 49	Gerek yok
B	Gerek yok	Denklem 50	Denklem 50	Denklem 50	Gerek yok
C	Gerek yok	0	Denklem 51	0	Gerek yok
D	Gerek yok	0	Denklem 52	Denklem 52	Gerek yok
E	Gerek yok	Denklem 53	Denklem 53	0	Gerek yok

Bu beş adet adi diferansiyel denklem takımı, nümerik integrasyon metotlarından biri kullanılarak, gerekli çalışma şartları için çözülebilir ve sonuç olarak silindir içi basınç, yanmış gaz sıcaklığı, iş ve ısı transferi tahminlerinin krank açısına göre değişimleri

belirlenebilir. Çalışmamızda kullanılan bağımsız değişken krank mili açısının adımı, hassasiyeti artırmak amacıyla 0,1 derece olarak seçilmiştir.

Çalışmamızda dördüncü mertebeden Runge-Kutta nümerik integrasyon metodu kullanılmıştır. Carl Runge (1856-1927) ve Wilhelm Kutta (1867-1944) tarafından gerçekleştirilen Runge- Kutta metodu adi diferansiyel denklemlerinin çözümünde kullanılan en popüler metottur (Brian and Breiner 1999).

3.1.2. Atık ısı kazanı matematik modelinin oluşturulması

Doğal gaz motorunun değişen motor yüküne göre çalışmasıyla

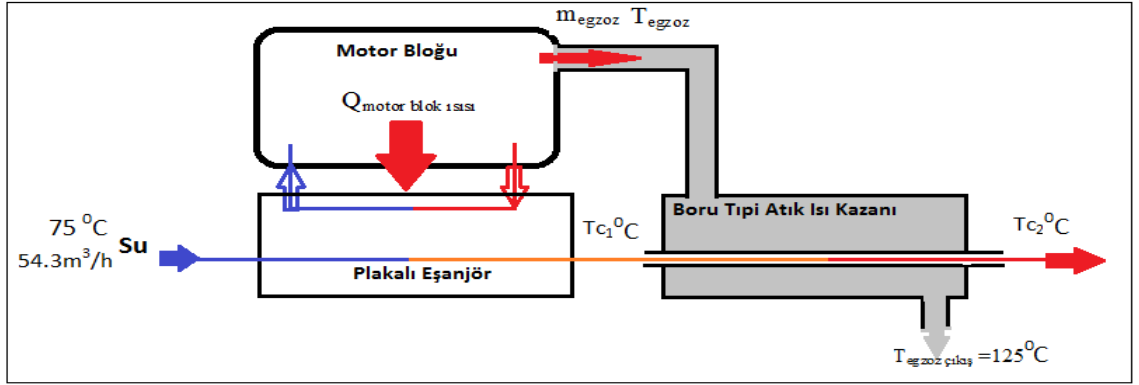
- 1) Motor bloğundan atılan ısıdan faydalanılır.
- 2) Egzoz gazlarının ısısından faydalanılır.

Elde edilecek bu iki ısı değerinin büyüklüğü motorun çalışma yüküne göre değişecektir.

- Motor bloğu soğutma suyundan alınan ısı enerjisini yararlı enerjiye çeviren bir adet plakalı eşanjör kullanılmıştır.
- Egzoz gazlarının ısı enerjisini almak için ise 1 adet boru tipi atık ısı kazanı kullanılmıştır.

Bu faydalı ısı enerjisi kışın hastanenin ısıtma ihtiyacı için yazın ise absorpsiyonlu soğutma sistemine gönderilerek hastanenin soğutma ihtiyacı için kullanılacaktır.

Her iki eşanjörde üretilen faydalı ısıyı üzerine alıp taşıması için $54.3\text{m}^3/\text{h}$ debide ve 75°C dönüş sıcaklığında su kabulüyle modelleme yapılmıştır. Şekil 3.7’de şematik gösterimi verilen sistemde önce $54.3\text{m}^3/\text{h}$ debide ve 75°C giren su motor bloğunun ısısını üzerine alarak T_{c1} sıcaklığına yükselmekte daha sonra boru tipi atık ısı kazanına girerek T_{c2} sıcaklığına yükselmektedir.



Şekil 3.7. Açık termodinamik sistem olarak motorda üretilen ısıyı kullanmak için oluşturulan sistem şeması

Sistemin matematik modeli aşağıdaki kabullerle yapılmıştır:

1. Sistem tümüyle termodinamik dengededir.
2. Sistem analizi sürekli ve üniform durum şartları için yapılmıştır.
3. Sistemden ısıyı taşıyan eleman su dur. $54.3\text{m}^3/\text{h}$ debide ve 75°C sıcaklıkta sisteme girdiği kabul edilmiştir.
4. Suyun özgül ısısı ($C_{p\text{ su}}$) sabit kabul edilmiştir.

plakalı eşanjörde ki süreçte, $54.3\text{m}^3/\text{h}$ debide ve 75°C sıcaklıkta giriş yapan su, motorun çalışma yükü ile değişecek olan motor blok ısısı'nın ($Q_{\text{motor blok ısısı}}$) tamamen üzerine alarak T_{c1} sıcaklığına yükselecektir. Burada T_{c1} :

$$T_{c1} = \frac{Q_{\text{motor blok ısısı}}}{54.3\text{m}^3/\text{h}} + 75\text{C} \quad 3.59$$

Boru tipi atık ısı kazanında ki süreçte ise, ısı değiştiricileri için kullanılan Etkinlik – NTU yöntemi kullanılarak model için denklemler oluşturulacaktır. Motorun çalışma yükü ile değişecek olan egzoz gazının sıcaklığı, debisi ve egzoz gazlarının özgül ısı değeri'ne ($C_{p\text{ egzoz}}$) bağlı olarak egzoz gazından alınacak ısı enerji miktarının tamamını $54.3\text{m}^3/\text{h}$ debide ve T_{c1} sıcaklığında giren suya aktararak T_{c2} sıcaklığına yükselecektir.

Isı transfer etkinliği (ϵ) olarak adlandırılan bir boyutsuz parametreye dayanan Etkinlik – NTU yöntemi şöyle tanımlanır:

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{\text{maks}}} = \frac{\text{Gerçek ısı transfer hızı}}{\text{Olabilecek maksimum ısı transfer hızı}} \quad 3.60$$

Olabilecek maksimum ısı transfer hızı, maksimum sıcaklık farkının da gerçekleşir. Buda sıcak ve soğuk akışkanların giriş sıcaklıkları arasındaki farktır.

$$\Delta T_{\text{maks}} = T_{\text{egzoz giriş}} - T_{C1} \text{ dir.} \quad 3.61$$

Sıcak ve soğuk akışkanlar için debi ve özgül ısı çarpımlarının büyük ve küçük olduğu değerler ise,

$$C_{\text{min}} = m_{\text{egzoz}} * C_{p \text{ egzoz}} \quad 3.62$$

$$C_{\text{maks}} = m_{\text{su}} * C_{p \text{ su}} \text{ değerleridir.} \quad 3.63$$

Isı kapasite hızı daha küçük olan akışkan (egzoz gazı) daha büyük bir sıcaklık değişimine ve dolayısıyla ısı transferinin durduğu noktadaki maksimum sıcaklığa ilk önce erişecektir. Bundan dolayı bir ısı değiştiricide olabilecek maksimum ısı transfer hızı,

$$Q_{\text{maks}} = C_{\text{min}} * \Delta T_{\text{maks}} \text{ dır.} \quad 3.64$$

$$\epsilon = \frac{m_{\text{su}} * C_{p \text{ su}} * (T_{C2} - T_{C1})}{m_{\text{egzoz}} * C_{p \text{ egzoz}} * (T_{\text{egzoz giriş}} - T_{C1})} \text{ elde edilir.} \quad 3.65$$

Isı transfer etkinliği (ϵ), $C = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$ ve transfer birim sayısı $NTU = \frac{A_s \cdot U}{C_{\min}}$ ile belirlenir.

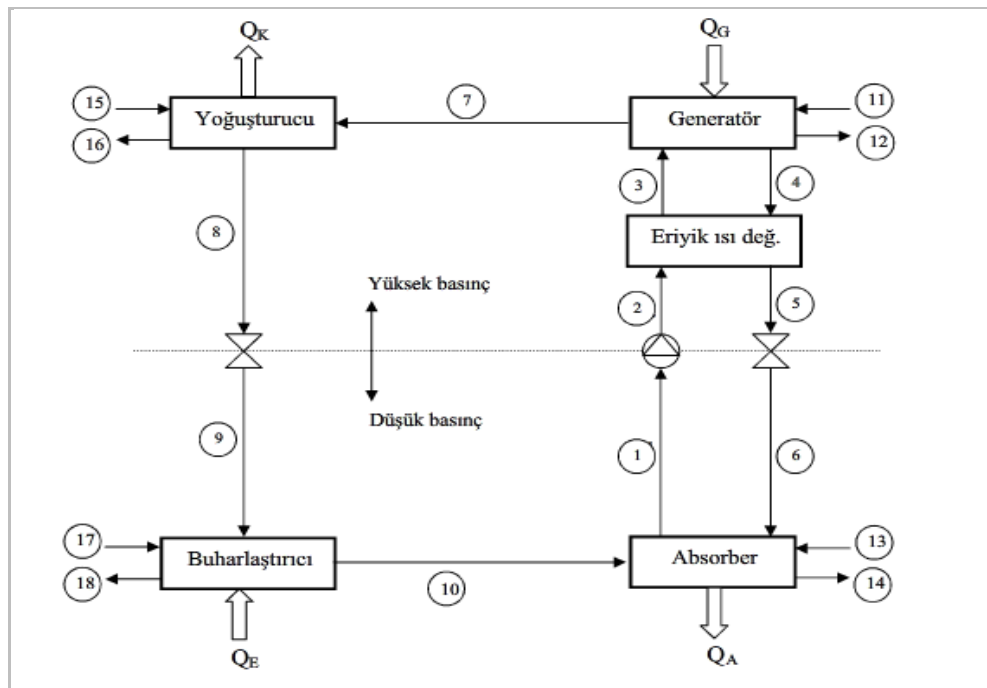
Burada A_s : ısı transfer yüzey alanı ve U :ısı transfer katsayısıdır. Bu değer eşanjörün tipine göre de değişir. (Çengel Y.A 2010)

$$\epsilon = \frac{\exp[(1-C)NTU]-1}{[(1-C)NTU]-C} \quad 3.66$$

kullanmış olduğumuz boru tipi atık ısı kazanı için Isı transfer etkinliği (ϵ)'nin literatür değeri 0,8538 hesaplanmıştır.

3.1.3. Absorbsiyonlu soğutma sisteminin modellenmesi

Motor yükünün değişimine göre atık ısı kazanından elde edilen ısı enerjisini soğutma enerjisine çeviren absorpsiyonlu soğutma Sisteminin matematiksel modelinin çıkarılabilmesi için Şekil 3.8'de belirtilen sistem akış diyagramına göre her bir elemana giren ve çıkan akımlar belirlenir.



Şekil 3.8. Tek etkili absorpsiyonlu soğutma sisteminin elemanları

Bu akımlar arasındaki giriş ve çıkışlar şöyle tanımlanabilir.

(1)-(2): soğutucu akışkanca zengin olan eriyik (fakir eriyik), absorberden bir pompa yardımıyla eriyik ısı değiştiricisine pompalanır.

(2)-(3): fakir eriyik ısı değiştiricisinden geçer ve bir miktar ısı alır.

(3)-(7): fakir eriyik generatöre gelir. Generatörden sağlanan ısı enerjisi ile (Q_G); eriyik içindeki soğutucu akışkan absorbentten ayrılır.

(7)-(4): LiBr konsantrasyonu fazla olarak generatörden ayrılan eriyik (zengin eriyik) ısı değiştiricisine gider.

(4)-(5): zengin eriyik ısı değiştiricisinde, generatörden aldığı enerjinin bir kısmını absorberden generatöre gitmekte olan fakir eriyiğe vererek onu ısıtır.

(5)-(6): yüksek basınçta bulunan zengin eriyik genleşme valfi ile basıncı düşürülerek düşük basınçta absorbere gelir.

(7)-(8): buhar halindeki soğutucu akışkan sıvı hale geçer.

(8)-(9): yüksek basınçta bulunan sıvı haldeki soğutucu akışkanın basıncı düşürülerek buharlaştırıcıya gönderilir.

(9)-(10): basıncı düşen soğutucu akışkan ortam ısını alarak buharlaştırıcıda buhar haline geçer.

(10)-(1): soğutucu akışkan buharı absorbere giderek burada generatörden gelen zengin eriyikle birleşerek fakir eriyiği meydana getirir ve çevrim böylece devam eder.

Sistemin matematiksel modeli aşağıdaki kabullerle yapılmıştır:

1. Sistem tümüyle termodinamik dengededir.
2. Sistem analizi sürekli ve üniforma durum şartları için yapılmıştır.
3. Generatörden ayrılan soğutucu akışkan buharının sıcaklığı ve basıncı, generatör sıcaklığı ve basıncındadır.
4. Yoğuşturucudan ayrılan soğutucu akışkan, doymuş sıvı şartlarında saf sudur ve yoğuşturucu sıcaklığında yoğuşturucudan çıkmaktadır.
5. Buharlaştırıcıdan ayrılan soğutkan buharı, kuru doymuş buhar şartlarında ve buharlaştırıcı sıcaklığındadır.
6. Absorberden ayrılan eriyik, absorber basınç ve sıcaklığında denge halindedir.
7. Generatörden ayrılan eriyik, generatör basınç ve sıcaklığında denge halindedir.
8. Isı kayıpları ve basınç düşüşleri ihmal edilmiştir.
9. Pompa işi ihmal edilmiştir.
10. Kısılma vanası süreçleri adiyabatik, pompadaki süreçler izentropiktir.

Sistem akış diyagramı esas alınarak, her bir sistem elemanına kütle ve enerji eşitlikleri uygulanarak aşağıdaki eşitlikler elde edilmiştir (Herold vd 1996; Alefeld and Radermacher 1994);

Absorberde kütle ve enerji denge eşitlikleri:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_6 + \dot{m}_{10} \quad 3.67$$

$$\dot{m}_1 X_1 = \dot{m}_6 X_6 + \dot{m}_{10} X_{10} \quad 3.68$$

$$Q_A = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_1 h_1 \quad 3.69$$

Generatörde kütle ve enerji denge eşitlikleri:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_7 \quad 3.70$$

$$\dot{m}_3 X_3 = \dot{m}_4 X_4 + \dot{m}_7 X_7 \quad 3.80$$

$$Q_G = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_3 h_3 \quad 3.90$$

Yoğuşturucuda kütle ve enerji denge eşitlikleri:

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 \quad 3.91$$

$$X_7 = X_8 \quad 3.92$$

$$Q_K = \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_8 h_8 \quad 3.93$$

Buharlaştırıcıda kütle ve enerji denge eşitlikleri:

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} \quad 3.94$$

$$X_9 = X_{10} \quad 3.95$$

$$Q_E = \dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_9 h_9 \quad 3.96$$

Eriyik ısı değiştiricide kütle ve enerji denge eşitlikleri:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad 3.97$$

$$X_2 = X_3 \quad 3.98$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 \quad 3.99$$

$$X_4 = X_5$$

$$Q_{ED} = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_5 h_5 \quad 3.100$$

Pompada kütle ve enerji denge eşitlikleri:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad 3.101$$

$$X_1 = X_2 \quad 3.102$$

$$W = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1 \quad 3.103$$

Eriyik genleşme valfinde kütle ve enerji denge eşitlikleri:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 \quad 3.104$$

$$X_5 = X_6 \quad 3.105$$

$$h_5 = h_6 \quad 3.106$$

Soğutkan genleşme valfinde kütle ve enerji denge eşitlikleri:

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad 3.107$$

$$X_8 = X_9 \quad 3.108$$

$$h_8 = h_9 \quad 3.109$$

Model için önemli bir parametre olan akış oranı, kütleli debiler cinsinden:

$$AO = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_7} \quad 3.110$$

veya konsantrasyonlar cinsinden:

$$AO = \frac{X_4}{X_4 - X_3} \quad 3.111$$

Yazılabilir.

Absorbsiyonlu soğutma sisteminin performans katsayısı, buharlaştırıcıda alınan ısı miktarının generatöre verilen ısı miktarına oranı olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$COP_{soğ} = \frac{Q_E}{Q_G} = \frac{\dot{m}_{10}h_{10} - \dot{m}_9h_9}{\dot{m}_7h_7 + \dot{m}_4h_4 - \dot{m}_3h_3} \quad 3.112$$

Buradan $COP_{soğ}$ değeri akış oranına bağlı olarak şu şekilde düzenlenebilir.

$$COP_{soğ} = \frac{Q_E}{Q_G} = \frac{h_{10} - h_9}{h_7 + AO(h_4 - h_3) - h_4} \quad 3.113$$

Burada performans katsayısının Evaporatör ısisına ve akış oranına bağlı olduğu görülmektedir. Evaporatör ısisıyla performans artacak buna karşı akış oranı artmasıyla performans azalacaktır.

LiBr-su Eriyiği ve Suyun Termodinamik Özelliklerinin Bulunması: Absorbsiyonlu sistemin simülasyonunun yapılabilmesi için LiBr-H₂O eriyiğinin basınç, sıcaklık, konsantrasyon, entalpi gibi termodinamik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

LiBr-Su Eriyiğinin Entalpisi: LiBr-H₂O eriyiğinin entalpisi $h(\text{kJ/kg})$; LiBr konsantrasyonu $X (\%)$ ve eriyik sıcaklığına $T^0(\text{C})$ bağlıdır (Sun 1997).

$$h(T, X) = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^2 a_{ij} X^i T^j \quad 3.114$$

3.114 eşitliğindeki katsayılar çizelge 3.6'da verilmektedir.

Çizelge 3.6. LiBr-su eriyiğinin entalpisinin hesabı için denklem katsayıları

i	j	a_{ij}	i	j	a_{ij}	i	j	a_{ij}
0	0	1,134125	0	1	4,124891	0	2	$5,743693 \times 10^{-4}$
1	0	$-4,80045 \times 10^{-1}$	1	1	$-7,643903 \times 10^{-2}$	1	2	$5,870921 \times 10^{-5}$
2	0	$-2,161438 \times 10^{-3}$	2	1	$2,589577 \times 10^{-3}$	2	2	$-7,375319 \times 10^{-6}$
3	0	$2,336235 \times 10^{-4}$	3	1	$-9,500522 \times 10^{-5}$	3	2	$3,277592 \times 10^{-7}$
4	0	$-1,188679 \times 10^{-5}$	4	1	$1,708026 \times 10^{-6}$	4	2	$-6,062304 \times 10^{-9}$
5	0	$2,291532 \times 10^{-7}$	5	1	$-1,102363 \times 10^{-8}$	5	2	$3,901897 \times 10^{-11}$

LiBr-H₂O Eriyiğinin Yoğunluğu: Eriyiğin yoğunluğu $\rho(\text{kg/m}^3)$, LiBr konsantrasyonu $X (\%)$ ve eriyik sıcaklığına $T(^0\text{C})$ bağlıdır (Sun 1997).

$$\rho(T, X) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^2 a_{ij} X^i T^j \quad 3.115$$

3.115 eşitliğindeki katsayılar Çizelge 3.7'de verilmektedir.

Çizelge 3.7. LiBr-su eriğinin yoğunluğunun hesabı için denklem katsayıları

i	j	a_{ij}	i	j	a_{ij}	i	j	a_{ij}
0	0	$9,939006 \times 10^{-1}$	0	1	$-5,631094 \times 10^{-4}$	0	2	$1,392527 \times 10^{-6}$
1	0	$1,046888 \times 10^{-2}$	1	1	$1,633541 \times 10^{-5}$	1	2	$-2,801009 \times 10^{-7}$
2	0	$-1,667939 \times 10^{-4}$	2	1	$-1,110273 \times 10^{-6}$	2	2	$1,734979 \times 10^{-8}$
3	0	$5,332835 \times 10^{-6}$	3	1	$2,882292 \times 10^{-8}$	3	2	$-4,232988 \times 10^{-10}$
4	0	$-3,440005 \times 10^{-8}$	4	1	$-2,523579 \times 10^{-10}$	4	2	$3,503024 \times 10^{-12}$

LiBr-H₂O Eriyiğinin Doyma Sıcaklığı: LiBr-H₂O eriyiğinin doyma sıcaklığı T_d (°C); LiBr konsantrasyonu X (%) ve eriyik sıcaklığı T (°C)'ye bağlı olup aşağıdaki şekilde yazılabilir (Sun 1997).

$$T_d(T, X) = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^2 a_{ij} X^i T^j \quad 3.116$$

3.116 eşitliğindeki katsayılar Çizelge 3.8'de verilmektedir.

Çizelge 3.8. LiBr-su eriğinin doyma sıcaklığının hesabı için denklem katsayıları

i	j	a_{ij}	i	j	a_{ij}	i	j	a_{ij}
0	0	$-1,313448 \times 10^{-1}$	0	1	$9,967944 \times 10^{-1}$	0	2	$1,978788 \times 10^{-5}$
1	0	$1,820914 \times 10^{-1}$	1	1	$1,778069 \times 10^{-3}$	1	2	$-1,779481 \times 10^{-5}$
2	0	$-5,177356 \times 10^{-2}$	2	1	$-2,215597 \times 10^{-4}$	2	2	$2,002427 \times 10^{-6}$
3	0	$2,827426 \times 10^{-3}$	3	1	$5,913618 \times 10^{-6}$	3	2	$-7,667546 \times 10^{-8}$
4	0	$-6,380541 \times 10^{-5}$	4	1	$-7,308556 \times 10^{-8}$	4	2	$1,201525 \times 10^{-9}$
5	0	$4,340498 \times 10^{-7}$	5	1	$2,788472 \times 10^{-10}$	5	2	$-6,64171 \times 10^{-12}$

Doymuş Suyun Entalpisi: Doymuş su buharının entalpisi aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Gündüz 1991):

$$h_f = -5,4008.10^{-2} + 4,2170T - 1,0596.10^{-3}T^2 + 1,1679.10^{-5}T^3 - 4,7893.10^{-8}T^4 + 1,0997.10^{-10}T^5 \quad 3.117$$

Doymuş Su Buharının Entalpisi: Doymuş su buharının entalpisi aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Gündüz 1991):

$$h_g = 2501,4 + 1,8394T - 2,5062.10^{-5}T^2 - 1,0829.10^{-5}T^3 + 2,9167.10^{-8}T^4 - 1,1126.10^{-10}T^5 \quad 3.118$$

Su Buharının Doyma Basıncı: Su buharının doyma basıncı aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Florides vd 2003):

$$P = 2.10^{-12}T^6 - 3.10^{-9}T^5 + 2.10^{-7}T^4 + 3.10^{-5}T^3 + 0,0014T^2 + 0,0444T + 0,6108 \quad 3.119$$

LiBr-su akışkan çiftinin sıcaklık ve konsantrasyonuna göre ve her bir adımdaki doymuş su ve doymuş su buharının sıcaklığına bağlı olarak entalpi değerlerini hesaplamak için MATLAB bilgisayar programı kullanılmıştır. Bu hesaplamalar ile sistemin değişen generatör sıcaklığına göre ve kondenser ile evaporatör sıcaklıklarının değişik şartlardaki durumu için sistemin soğutma performans katsayısı $COP_{soğ}$ değerindeki değişim incelenmiştir.

3.2. Sistemin Ekonomik Açıdan İncelenmesi

Trijenerasyon santralinin ekonomik yönden maliyet analizinin yapılması ve amortisman süresince kar durumunun ortaya çıkartılması fizibilite araştırması yönünden gereklidir.

Projelene santralin ekonomik analizi aşağıda başlıklar altında incelenmiştir;

- Keşif zeti
- Toplam Masraflar (sabit masraflar + değişen masraflar)
- Gelir-gider tablosu
- Geri deme süresinin belirlenmesi

3.2.1. Keşif zeti

Keşif zeti ile toplam proje bedeli ortaya çıkarılmakta ve yatırım bu bedele göre değerlendirilmektedir. İlk yatırım maliyetindeki kalemler aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır.

- Sistem için gerekli inşaat işlerinin yaklaşık maliyetinin belirlenmesi.
- Sitemde kullanılacak mekanik imalatların yaklaşık maliyetlerinin belirlenmesi.
- Sistemde kullanılacak elektrik imalatlarının yaklaşık maliyetinin belirlenmesi

3.2.2. Sabit masraflar

Kojenerasyon santralinin kurulması ve işletilmesi aşamasında yıl içerisinde her türlü şartta miktarı değişmeyen masrafları oluşturmaktadır. Sabit masraflar aşağıda sıralanmaktadır.

- Amortisman
- Sigorta

3.2.2.a. Amortisman hesabı

Kojenerasyon santralinin maliyetinin yararlı ömrüne sistematik bir şekilde dağıtılması amortisman payı ile sağlanmaktadır. Tesisin toplam yatırım maliyeti, değerinin bir yıl

için ne kadarının karşılandığı (amortismanı) bir değere getirilmiş maliyetler üzerinden hesaplanır. En sık kullanılan yöntem, tesisin yatırım ömrü boyunca her yıl eşit miktarda amortisman sağlayacağı düşünülerek yapılan hesaplamalardır.

Sabit yıllık amortisman veya sabit yıllık sermaye maliyeti olarak adlandırılan bu yöntemde şimdiki değeri (I) (TL) olan bir yatırımın sabit yıllık amortisman bedeli aşağıdaki şekilde hesaplanır (Aybers ve Şahin 1995);

$$C_K = I \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \text{ (TL/yıl)} \quad 3.120$$

i yıllık faiz oranını, n ise tesisin kullanım süresini (yıl) göstermektedir. Trijenerasyon santrallerinin proje aşamasında kullanılan ekonomik ömür Enerji Bakanlığı verilerine göre 20 yıl olarak belirlenmiştir. Hesaplamalar sırasında her yıl için ödenecek amortisman değeri sabit masrafların amortisman payını oluşturmaktadır.

3.2.2.b. Sigorta hesabı

Trijenerasyon santrallerinde çalışan makinelere, binaya, işçilere ve üçüncü şahıslara, her türlü kaza, yangın, infilak, terör ve depreme karşı her yıl sigorta yaptırılması gerekmektedir. Tesis için yaptırılacak sigortanın yıllık ödenmesi gereken miktarı sabit masrafların sigorta giderlerini oluşturmaktadır.

Tesisin yatırım bedelinin binde 5 oranı yangın, yıldırım, infilak, terör primi olarak, yatırım bedelinin binde 3.3 oranı ise deprem primi olarak her yıl sigorta şirketine ödenmesi gerekmektedir.

3.2.3. Değişen masraflar

Yıl içerisinde kullanımına bağlı olarak değişim gösteren masrafların toplamı değişen masrafları oluşturmaktadır. Değişen masraflar aşağıda sıralanmaktadır.

- Yakıt giderleri
- İşçilik giderleri
- Tamir-Bakım giderleri
- Yağlama giderleri

3.2.3.a. Yakıt giderleri

Hastanenin günün saatlerine göre değişen elektrik talebini karşılamak için çalışacak motorların yüküne göre değişen motorun yakıt miktarıdır. Doğal gaz fiyatları üst ısı değer üzerinden belirlenmektedir. Erzurum Gaz Dağıtım Şirketi Palen A.Ş.'den alınan ÜİD bazında doğalgaz fiyatı Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. KDV dahil yakıtın üst ısı değeri bazında doğalgaz fiyatı

Doğalgaz Satış Tarifesi

TEMMUZ 2013 ERZURUM

Tüketim Grubu	Doğalgaz Fiyatı (TL/Sm3)	Sistem Kullanım Bedeli (TL/Sm3)	Uygulanacak Fiyat (TL/Sm3)	KDV Dahil Fiyat (TL/Sm3)
0-300.000 Sm3 Arası	0,801405	0,061445	0,862850	1,018163
300.000 Sm3 Üstü	0,740783	0,061445	0,802228	0,946629

TEMMUZ 2013 ERZURUM

Tüketim Grubu	Doğalgaz Fiyatı (TL/Kwh)	Sistem Kullanım Bedeli (TL/Kwh)	Uygulanacak Fiyat (TL/Kwh)	KDV Dahil Fiyat (TL/Kwh)
0-300.000 Sm3 Arası	0,07532001	0,00577491	0,08109492	0,09569201
300.000 Sm3 Üstü	0,06962246	0,00577491	0,07539737	0,08896890

3.2.3.b. İşçilik giderleri

Santralde geçici ve daimi olarak çalıştırılan teknik eleman veya işçilere ödenen yıllık miktarıdır. Her gün üç vardiya olarak 1 adet teniysen ve 2 adet yardımcı elemanın görev yapması planlanmıştır. Sistemin gece çalıştırılmadığı periyotlarda vardiya yapılmayacaktır.

3.2.3.c. Tamir ve bakım giderleri

Santralde çalışan makinelerin yıllık tamir ve bakımını kapsamaktadır. Bu gider içinde en önemli kalem motorların bakımındır. Sistemin tamir ve bakım periyodu gaz motorlarının çalışma sürelerine göre belirlenmektedir. Gaz motorlarının yıllık çalışma süresi Çizelge 3.10’da verilmektedir.

Çizelge 3.10. Gaz motorlarının yıllık çalışma süresi

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam
I. Motor Çalışma Süresi (saat)	604	546	605	450	465	450	465	465	450	465	555	555	6075
II. Motor Çalışma Süresi (saat)	604	546	605	450	465	450	465	465	450	465	555	555	6075

Siteme dört şekilde rutin bakım uygulanır.

1. Bakım: her 1.500 saat için yapılır. (Motor yağ değişimi de bu bakım içindedir.)
2. Bakım: her 4.500 saat için yapılır.
3. Bakım her 12.000 saat için yapılır.
4. Bakım ağır bakımdır 60.000 saat sonunda yapılır.

Bu bakımlarda hangi işlemlerin yapıldığı Şekil 3.9’da verilmektedir.

	İşletme Saati				Ağır Bakım
	Her 1500 saat	4000 saat sonra	12.000 saat	24.000 Bh 36.000 Bh 48.000 Bh	
1 Yağ değişimi	X	X	X	X	
2 Yağ filtresinin yenilenmesi	X	X	X	X	
3 Batarya duru ve voltajın kontrolü/gerektiğinde saf su doldurma	X	X	X	X	
4* Hava filtresinin değişimi	X	X	X	X	
5 Subap ölçümü ve gerektiğinde ayarlanması	X	X	X	X	
6 Ateşleme kablosu çapının ölçümü, kontrolü ve gerektiğinde değişimi, ateşleme buji soketinin kontrolü	X	X	X	X	
7 Antifriz konsantrasyonun kontrolü ve gerektiğinde takfiye edilmesi			X	X	
8 Kompresyon basıncının kontrolü			X	X	
9 Jeneratör hava emisyonun kontrolü ve temizliği			X	X	
10 Bujilerin değişimi		X	X	X	
11 Gücün test edilmesi			X	X	
12 İndüksiyon bobini değişimi			X	X	X
13 Manş motoru			X		X
14 Plakalı eşanjörün kontrolü ve gerektiğinde değişimi			X		X
15 Gemischkühler kontrolü, gerektiğinde değişimi			X		X
16 Silindir başlığı kontrolü, gerektiğinde değişimi			X		
17 Oksidationskatalysator kontrolü, gerektiğinde değişimi			X		X
18 Motor revizyonu					X

Şekil 3.9. Gaz motorlarına yapılan bakımlar.

Gaz motorunun yıllık 6000 saat ortalama çalışma süresine göre ağır bakıma kadar yapılacak bakım periyotları Şekil 3.10’da verilmiştir.

	1.yıl	2.yıl	3.yıl	4.yıl	5.yıl	6.yıl	7.yıl	8.yıl	9.yıl	10.yıl
Her 1500 saat de bir Bakımı										
Her 4500 saatte bir bakımı										
Her 12000 saatte bir bakım										
60.000 saat sonunda ağır bakım										

Şekil 3.10. Ağır bakıma kadar gaz motorlarına yapılan bakım periyotları

Buna göre motorlar ağır bakım sürecinde dahil olmak üzere 10 yıllık periyotta hangi bakımı kaç kez görecekları Çizelge 3.11’de verilmiştir.

Çizelge 3.11. Motorların yıllık bakım periyodu

	1.Yıl	2.Yıl	3.Yıl	4.Yıl	5. Yıl	6. Yıl	7. Yıl	8. Yıl	9. Yıl	10. Yıl
1.bakım	4 defa	4 defa	4 defa	4 defa	4 defa	4 defa	4 defa	4 defa	4 defa	4 defa
2.bakım	1 defa	1 defa	2 defa	1 defa	1 defa	2 defa	1 defa	1 defa	2 defa	1 defa
3.bakım			1 defa		1 defa		1 defa		1 defa	
4.bakım										1 defa

1.bakım periyodu için (1500 saat) ödenecek para:

Yağ değişimi için ödenecek para: 3.488 TL

(her motor için yağ kapasitesi 228 kg dır. Toplam yağ miktarı 456 kg’dır.

Yüksek kaliteli SAE15W/40 ağır hizmet tipi motor yağı kg fiyatı: 7,65 TL (KDV dahil)

Sarf malzeme:2.913 TL

İşçilik:1.230 TL

Toplam:7.631 TL

2.bakım periyodu için (4.500 saat) ödenecek para:

Sarf malzeme: 41.800 TL

İşçilik : 4.760 TL

Toplam : 46.560 TL

3. Bakım periyodu için (12.000 saat)

Sarf malzeme: 106.840 TL

İşçilik : 15.320 TL

Toplam :122.160 TL

4. Bakım periyodu ağır bakım için (60.000 saat)

Sarf malzeme: 1096.740 TL

İşçilik : 65.450 TL

Toplam :1.162.190 TL

3.2.3.d. Yağlama giderleri

Motorların yağ tüketim değeri yaklaşık olarak 0,46 kg/h civarındadır (General elektrik katalog). Motorların yağ değişiminde gerekli yağ kapasitesi ise 228 kg'dır. Kojenerasyon motorlarında yağlama yağı olarak yüksek kaliteli SAE15W/40 ağır hizmet tipi motor yağı kullanılması tavsiye edilir.

3.2.4. Gelir gider tablosu

Tesis için yapılan model ışığında elde edilen teknik analiz sonuçları ile bir yıl boyunca hastanenin talep ettiği elektrik enerjisini karşılamak için çalışacak motorun değişen yük değerleri göz önüne alınarak elde edilen elektrik enerjisi çıktısı ile mevsime göre

değişen ısı enerjisi çıktısı ve soğutma enerjisi çıktısının toplam değerinin maddi getirisi her ay için hesap edilerek gelir tabloları oluşturulacaktır. Aynı şekilde bu modele göre çalışacak motorların sabit ve değişen giderleri de hesaplanarak gider tabloları oluşturulacaktır. Elektrik enerjisinin maddi gelirinin hesabında günün üç farklı tarife fiyatları göz önüne alınarak hesap yapılacaktır.

3.2.4.a. Elektrik tarife fiyatları

Ülkemizde elektrik şebekesinde iki türlü tarife kullanılmaktadır. Bunlar çift terimli ve tek terimli tarifiedir. Çift terimli tarife önceden belirlenen bir sözleşme gücü karşılığında fiyatlandırmanın yapıldığı tarifiedir ve bazı sanayi kuruluşlarınca tercih edilmektedir.

Genellikle kullanılan tarife tek terimli tarifiedir. Bu tarife tüketilen elektrik enerjisinin kWh miktarı üzerinden bedel alma esasına dayalı tarife sınıfıdır. Bu tarife sınıfında gün içerisinde belirli saat aralıklarında enerji fiyatları değişimi için; 1 Temmuz 2013 tarihinde TEDAŞ tarafından yayınlanan tüketicilere uygulanacak tarife fiyatları ve ilave edilecek fonlar Çizelge 3.12’de gösterilmiştir. Hastaneler ticarethane sınıfına girmektedir.

Çizelge 3.12. 01.06.2013 Tarihi itibariyle uyulan tedarik tarife fiyatları

Tarife	Birim Fiyatı TL [kWh]	İletim Bedeli TL [kWh]	Dağıtım Bedeli TL [kWh]	Enerji Fonu TL [kWh] (%1)	TRT Payı TL [kWh] (%2)	Kayıp Kaçak Bedeli TL [kWh]	Toplam TL [kWh]	KDV Dahil Toplam TL [kWh]
Gündüz	0,1862	0,0067	0,02093	0,00186	0,00372	0,04034	0,25975	0,306505
Puant	0,332	0,0067	0,02093	0,00332	0,00664	0,04034	0,40993	0,4837174
Gece	0,0766	0,0067	0,02093	0,00076	0,00152	0,04034	0,14685	0,173283

3.2.5. Geri ödeme süresinin belirlenmesi

Sistemin karlı olup olmadığını görmek için yatırımların değerlendirilmesinde pek çok yöntem vardır. Bu çalışmada iyi bilinen ve sık kullanılan geri ödeme periyodunun dinamik yöntemle belirlenmesi kullanılacaktır.

Geri ödeme periyodu projenin ilk yatırımı için gereken net nakit girişlerinin zamanının uzunluğudur. Dinamik faktörler de zaman faktörü göz önünde bulundurulur. Projenin başında değerlendirmek için projenin ekonomik ömründe net bugün ki değeri tüm girdi ve çıktılarıyla hesaplanır.

Yukarda hesaplanan tesisin ilk yatırım maliyeti ve gelir gider dengesinde çıkarılacak tesisin yıllık net karı ile yıllık %8 faiz oranı ve 20 yıllık çalışma ömrü göz önüne alınarak, tesis için geri ödeme süresi;

$$t_g = \frac{\ln\left[\frac{G_i}{(G_i - G_y * f)}\right]}{\ln(1+f)} \quad 3.121$$

Şeklinde hesaplanır. Burada;

t_g = geri ödeme süresi(Yıl)

G_i = tesisin net karı (TL)

G_y = ilk yatırım maliyeti (TL)

f = yıllık faiz oranıdır.

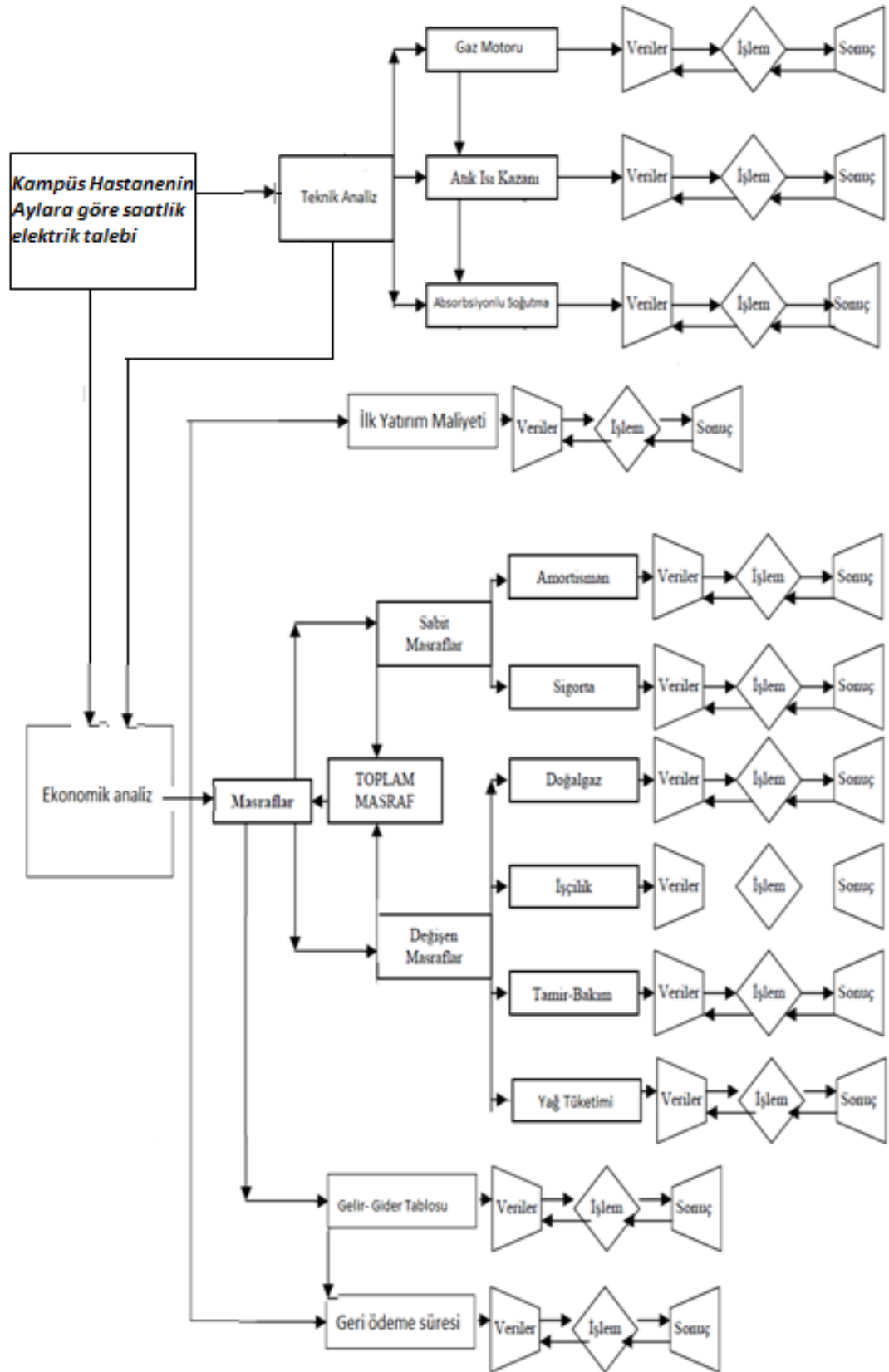
3.3. Sistemin Simülasyon Programı

Trijenerasyon santralının kurulum ve fizibilitesi için yapılan çalışmada, teknik analiz için oluşturulan motor modelinde, hastanenin talep ettiği saatlik elektrik ihtiyacını karşılamak için çalışacak gaz motorlarının değişen yüklerine göre saatlik yakacağı yakıt

miktarı, motor bloğundan alınacak ısı miktarı ile egzoz gazlarından alınacak ısı miktarının hangi oranda olacağı ve daha sonra oluşturulan atık ısı kazanı modeli ile motor yüküne göre değişen blok ısısı ve egzoz ısılarının faydalı ısı enerjisine ne oranda dönüştüğü ve motor yükü değişiminden elde edilecek faydalı ısı enerjisi miktarının ne kadar olacağı hesaplanmıştır.

Hastanenin yaz döneminde soğutma ihtiyacına katkı sağlayacak olan absorpsiyonlu soğutma sisteminin modellenmesi ile hastanenin saatlik değişen elektrik ihtiyacını karşılamak için çalışan motorların değişecek yüküne göre atık ısı kazanı modelinden hesaplanan ısı enerjisinin hangi oranda soğutma enerjisine dönüştürülebildiği ve saatlik alınan soğutma miktarının ne olduğu hesaplanmıştır.

Kampüs Hastane için, aylara göre düzenlenmiş ortalama saatlik değişen elektrik talebi verilerine göre çalışacak motorların yük değerleri belirlenmiştir. Teknik analiz sonuçları ile bu yük değerlerine karşılık gelen sistemin yıl boyunca yakacağı yakıt miktarı ve üreteceği elektrik, ısıtma ve soğutma enerjisi miktarı verileri ekonomik analiz için hazırlanan programa atılmış sistemin yakıt gideri ile tüm masraflar toplanıp bir yıl boyunca elde edilen ısıtma soğutma ve elektrik enerjisi karı ile gelir gider tabloları oluşturulmuştur. Bu tablolar ile sistemin net karı hesaplanmış ve ilk yatırım maliyeti verileri kullanılarak geri ödeme süresi bulunmuştur. Program algoritması Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Program algoritması

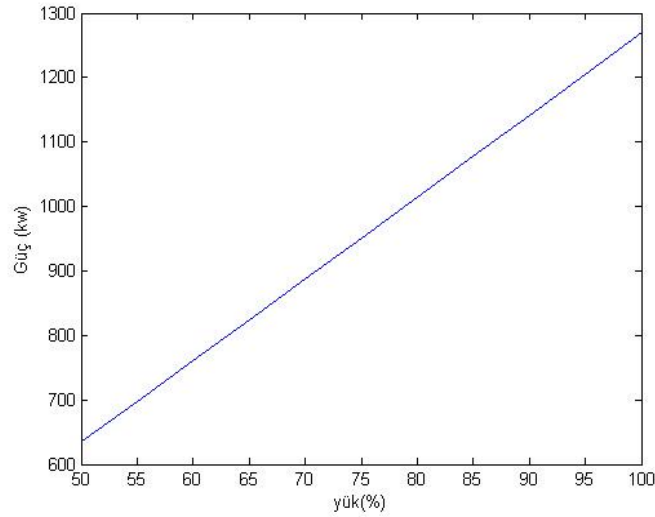
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Sistemin Teknik Analizinde Elde Edilen Bulgular

Erzurum Bölge ve Eğitim ve Araştırma Hastanesinden yıl boyunca saatlik olarak alınan elektrik tüketim değerleri ışığında tahmin edilerek hazırlanmış Erzurum Kampüs hastanesinin aylık günün saatlerine göre değişecek elektrik talebini karşılayacak trijenerasyon sisteminin, yıl boyunca üreteceği soğutma, ısıtma ve elektrik enerjisi miktarı ve buna karşı tüketileceği yakıt miktarının bulunması amacıyla yapılan teknik analizde, sistemdeki üç ana ekipman üzerine oluşturulan matematiksel modellerden elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

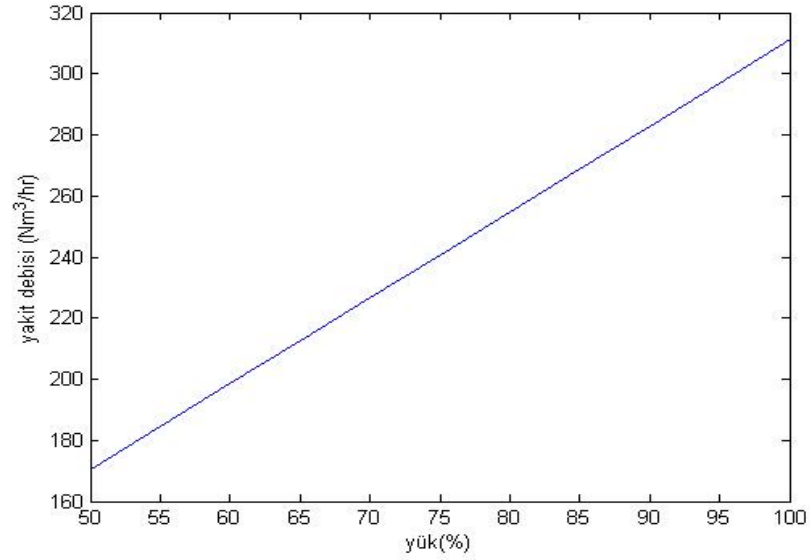
4.1.1. Gaz motorunun matematiksel modelinin oluşturulması ile elde edilen bulgular

Matematik modeli oluşturulan motor için motor yükündeki değişim baz alınmıştır. Yük değişimine göre tek bir gaz motorundan elde edilecek mekanik güç çıktısındaki değişimi gösteren grafik Şekil 4.1’de verilmiştir.



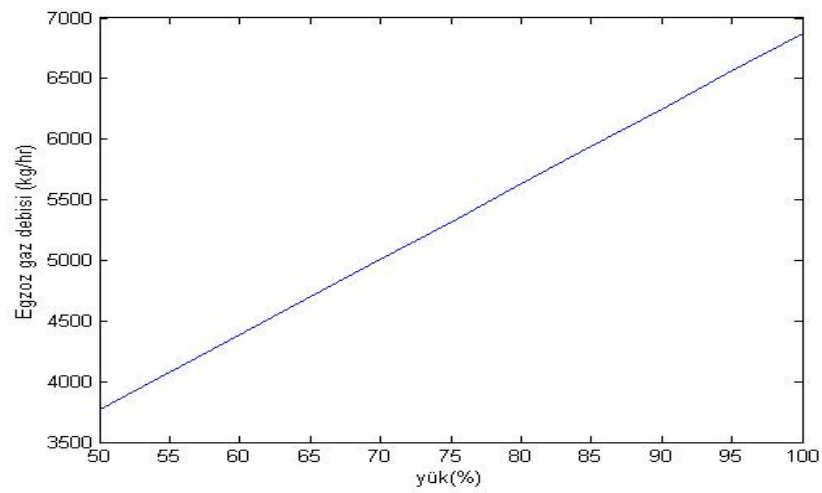
Şekil 4.1. Motor yüküne bağlı olarak elde edilen mekanik güç çıktısı

Gaz motorunun yükündeki değişime göre tüketeceği doğal gaz miktarının değişimini gösteren grafik Şekil 4.2’de verilmiştir.



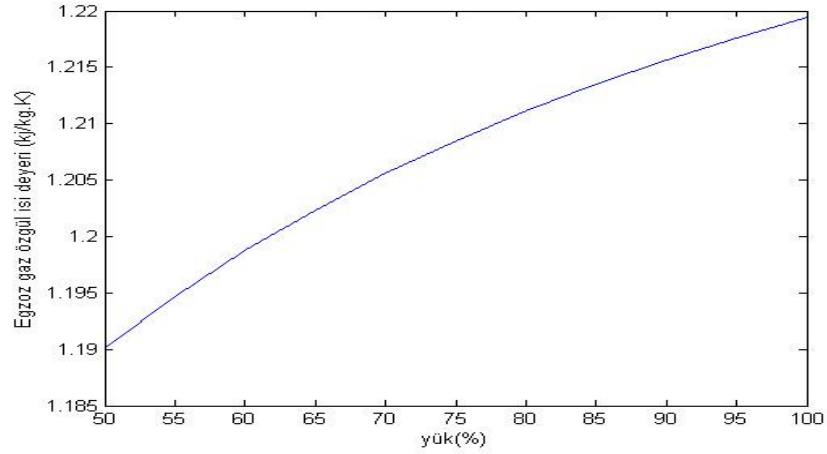
Şekil 4.2. Motor yüküne bağlı olarak motorun tüketeceği doğal gaz miktarı

Yalpan modeline göre, motorun yükündeki değişime göre egzozdan atılan gaz debisindeki değişim ise Şekil 4.3’de verilmiştir.



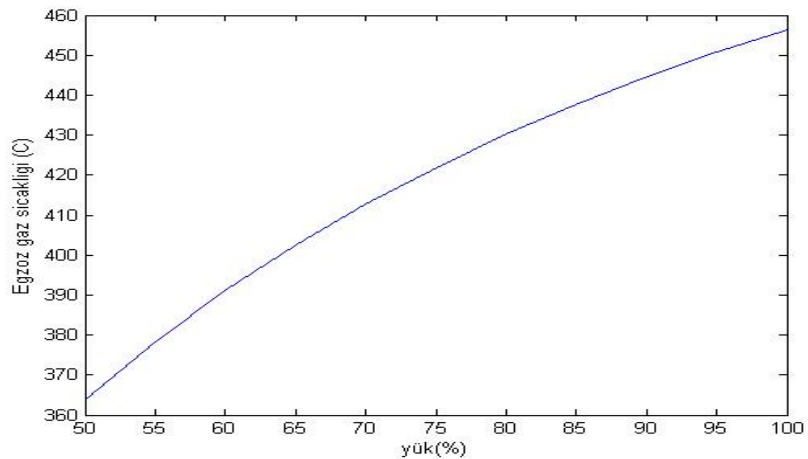
Şekil 4.3. Motor yüküne bağlı olarak egzozdan atılan gaz debisindeki değişim

Yapılan modele göre, motor yükü değişimine göre egzoz gazlarının özgül ısı değerindeki değişim Şekil 4.4’de verilmiştir.



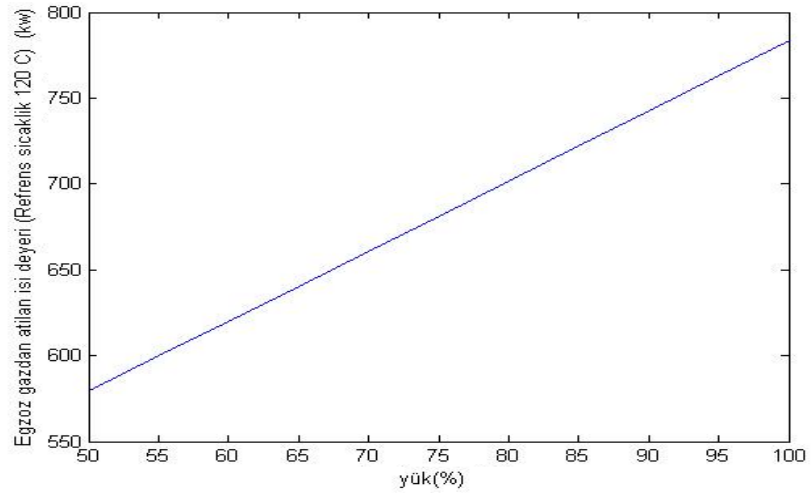
Şekil 4.4. Motor yüküne bağlı olarak egzoz gazlarının özgül ısı değerindeki değişim

Oluşturulan modele göre motorun egzoz gazlarının sıcaklığının motor yüküne göre değişimi ise Şekil 4.5’de grafik olarak verilmektedir.



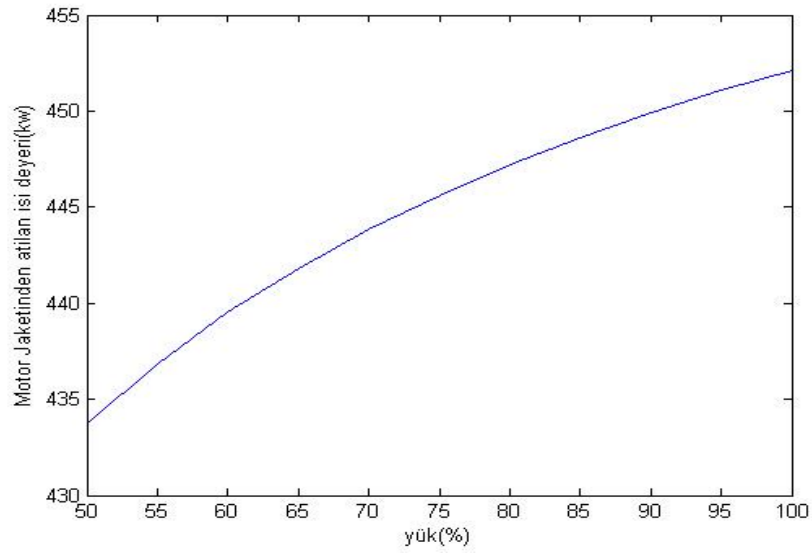
Şekil 4.5. Motor yüküne bağlı olarak egzoz gazlarının sıcaklığındaki değişim

Oluşturulan modele göre motorun egzozundan alınacak ısı enerjisinin motor yüküne göre değişimi ise Şekil 4.6’de grafik olarak verilmektedir.



Şekil 4.6. Motor yüküne bağlı olarak egzozdan alınan ısı değerindeki değişim.

Oluşturulan modele göre motor bloğundan alınacak ısıнын motor yüküne göre değişimi Şekil 4.7’de grafik olarak verilmiştir.

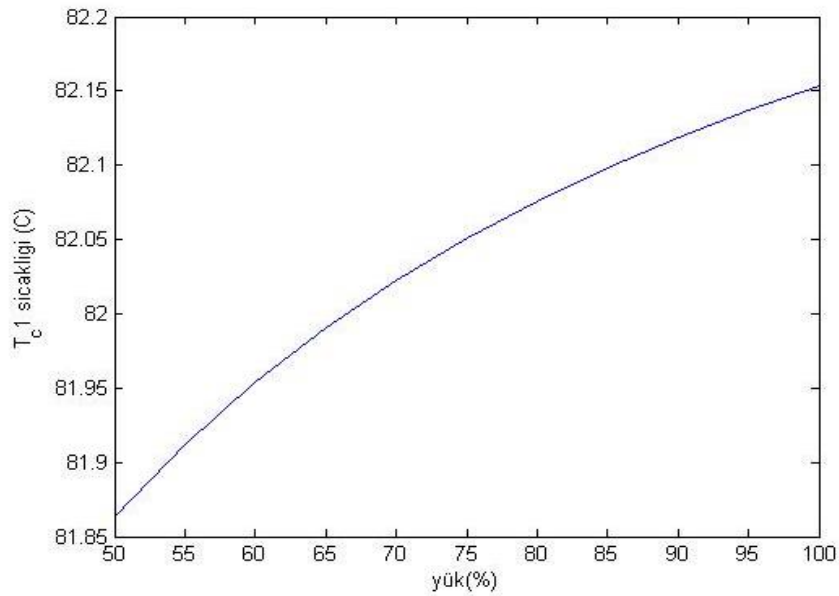


Şekil 4.7. Motor yüküne bağlı olarak egzozdan alınan ısı değerindeki değişim

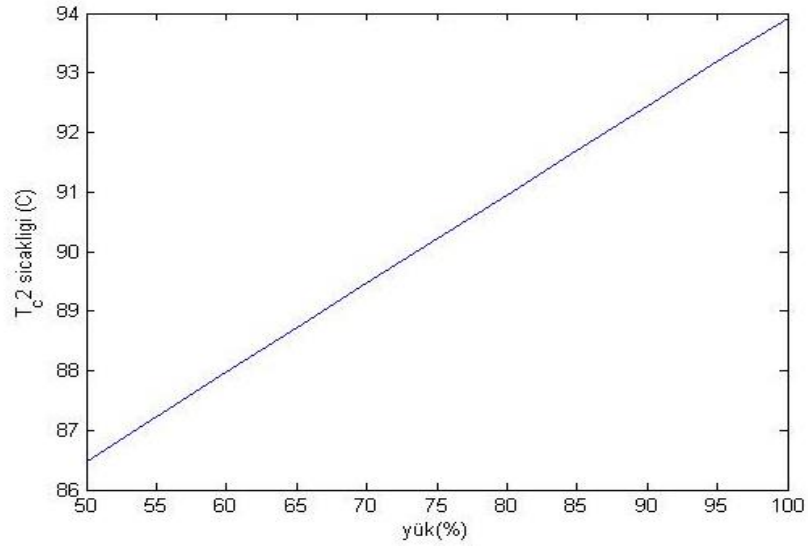
4.1.2. Atık ısı kazanının matematiksel modelinin oluşturulması ile elde edilen bulgular

Gaz motorlarından ısı enerjisi iki kademede alınmaktadır. Motor blok soğutma suyundan alınan ısı enerjisi miktarını kullanan bir adet plakalı ve egzoz gazlarının ısı enerjisini almak için kullanılan bir adet de boru tipi atık ısı kazanından $54,3\text{m}^3/\text{h}$ debide 75°C 'de giren sıcak su motor bloğunda alınan ısı ile ön ısıtma yapılarak Tc1 sıcaklığına getirilir. İkinci kademede boru tipi atık ısı kazanına Tc1 sıcaklığında giren su Tc2 sıcaklığına çıkarılmaktadır.

Sabit debide dolaşan su motor yükündeki değişime oranla değişecek motor bloğu ve egzoz ısı değerlerine göre değişim gösterecektir. Yapılan model ile motor yükündeki değişime bağlı olarak motor ceketinden alınan ısı ile ısıtılmış suyun çıkış sıcaklığı Tc1 ve daha sonra egzoz ısını alarak ısınan suyun çıkış sıcaklığı Tc2 değerlerinin değişimi Şekil 4.8 ve 4.9'de grafik olarak verilmektedir.



Şekil 4.8. Motorun yükündeki değişime bağlı olarak motor ceketinden alınan ısı ile ısıtılan suyun çıkış sıcaklığındaki değişim



Şekil 4.9. Motorun yükündeki değişime bağlı olarak egzoz gazlarından alınan ısı ile ısıtılan suyun çıkış sıcaklığındaki değişim

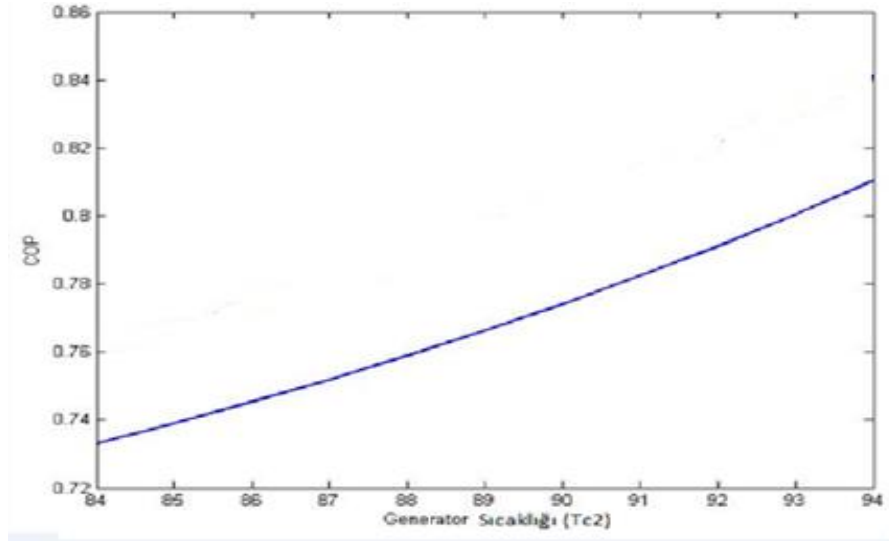
Sabit debide dolaştırılan suyun en son çıkış sıcaklığı T_{c2} değerine göre alınan faydalı ısı belirlenebilmektedir.

4.1.3. Absorbsiyonlu soğutma sisteminin matematiksel modelinin oluşturulması ile elde edilen bulgular

Kışın hastane ısıtmasına yardımcı olması için gönderilen T_{c2} sıcaklığındaki su yazın ise hastanenin soğutulması için kullanılacak olan Absorbsiyonlu Soğutma Sisteminin Generatörüne gönderilmektedir.

Yapılan Tek Etkili LiBr çözeltili Absorbsiyonlu Soğutma Sistemi modeline göre atık ısı kazanından çıkan suyun T_{c2} sıcaklığındaki değeri soğutma sisteminde yer alan generatöre giriş suyu sıcaklığını temsil etmektedir.

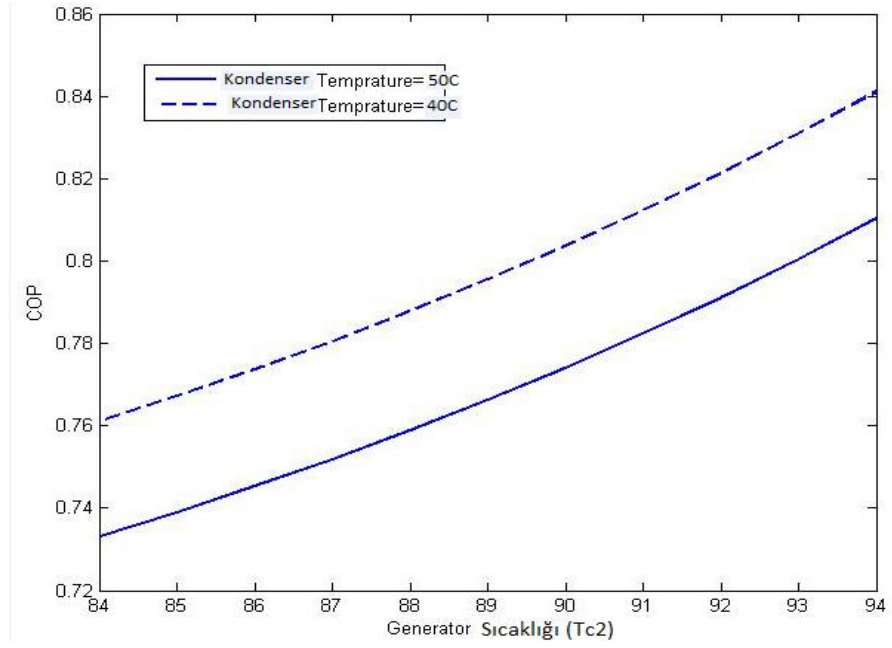
Soğutma performans katsayısı COP'nin generatör giriş sıcaklığı T_{c2}'ye göre değişimi Şekil 4.10'da verilmektedir.



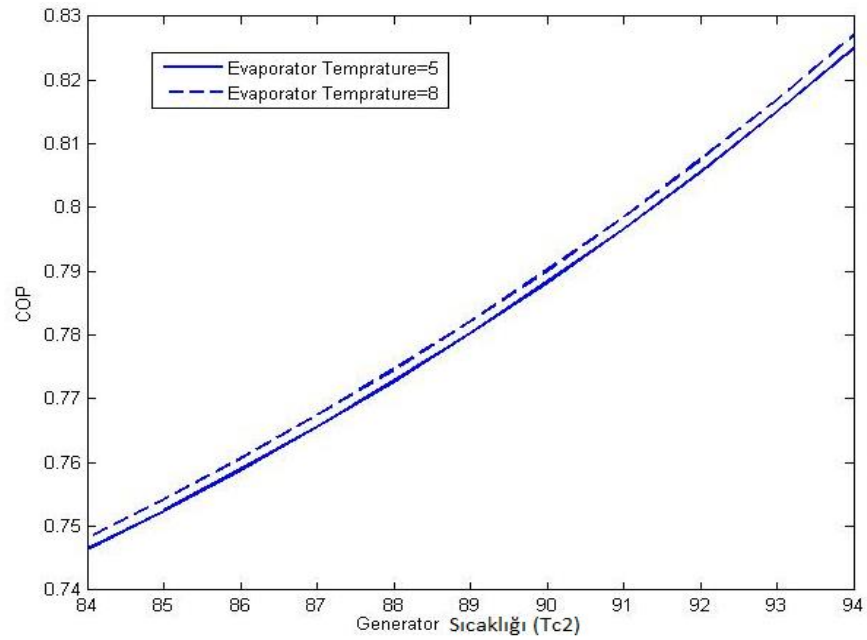
Şekil 4.10. Soğutma performans katsayısı COP'nin generatör giriş sıcaklığına göre değişimi

Generatör su giriş sıcaklığının artmasına bağlı olarak Soğutma performans katsayısı COP'nin değerinin artması beklenir. Beklendiği gibi, generatör su giriş sıcaklığının belli bir değerine kadar Soğutma performans katsayısı COP'nin değeri artmaktadır. Fakat generatör su giriş sıcaklığının daha fazla artırılması, evaporatör sıcaklığını düşüreceğinden bir noktadan sonra Soğutma performans katsayısı COP'nin değeri sabit kalmakta ve hatta azalmaya başlamaktadır.

Kondenser sıcaklığı düşürüldükçe Soğutma performans katsayısı COP'nin değeri artmaktadır. Buna ters olarak evaporatör sıcaklığı artırıldıkça Soğutma performans katsayısı COP'nin değeri artmaktadır. Generatör sıcaklığına bağlı olarak farklı kondenser sıcaklıklarında soğutma performans katsayısı COP'nin değişim miktarı Şekil 4.11'de ve farklı evaporatör sıcaklıklarına bağlı olarak değişimi ise Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Soğutma performans katsayısı COP'nin generatör sıcaklığının bir fonksiyonu olarak farklı kondanser sıcaklıklarında değişim eğrisi



Şekil 4.12. Soğutma performans katsayısı COP'nin generatör sıcaklığının bir fonksiyonu olarak farklı evaporatör sıcaklıklarında değişim eğrisi

Absorbsiyonlu soğutma sisteminin oluşturulan modelin de, motorun tam yükte olduğu periyotta soğutma sistem elemanlarının her biri için giriş çıkış akımı çalışma şartları Çizelge 4.1’de gösterildiği gibi elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. %100 Motor yükünde alınan ısı enerjisine göre absorbsiyonlu sistemin çalışma şartları

Nokta	Sıcaklık	h(kj/kg)	X /%LiBr)
1	35 °C	88,818	58,15
2	35 °C	88,818	58,15
3	52 °C	154,183	58,15
4	94 °C	265,221	63,60
5	52 °C	154,183	63,60
6	52 °C	154,183	63,60
7	94 °C	2761,94	-----
8	45 °C	156,67	-----
9	8 °C	156,67	-----
10	8 °C	2516,108	-----

Sistemin, Erzurum çalışma şartlarında yapılan motor modeli, atık ısı kazanı modeli ve absorpsiyonlu soğutma sistemi modeliyle gün içinde değişen elektrik talebini karşılayacak gaz motorunun çalışma yüküne göre üreteceği elektrik enerjisi, elde edilen net ısı enerjisi ve sağlanan soğutma enerjisi ile tüketeceği doğal gaz miktarı belirlenmiştir. Bu değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Motor yüküne göre yakılan yakıt miktarı ve sistemden sağlanan enerji miktarları

Motorun Çalışma Yüğü (%)	Tüketilen Doğal gaz Miktarı (Nm³/h)	Elektrik Enerjisi Çıktısı (kWh)	Isıtma Enerjisi Çıktısı (kWh)	Soğutma Enerjisi Çıktısı (kWh)
100	311	1264	1199,65	974,11
95	298	1200,8	1149,14	919,31
90	282	1137,6	1104,94	875,11
85	270	1074,4	1054,43	826,67
80	257	1011,2	1010,23	781,92
75	241	948	959,72	735,14
70	228	884,8	915,52	695,79
65	212	821,6	865,01	650,48
60	199	758,4	820,81	612,32
55	186	695,2	770,30	569,25
50	176	632	726,10	531,50

4.2. Sistemin Çalışma Rejimini Belirlenmesi

Erzurum iklim şartları dikkate alındığında hastane binasının soğutma enerji talebi Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül ve Ekim aylarında olmaktadır. Geçiş dönemi olan Nisan ve Mayıs aylarında elde edilen ısı enerjisi, gün içerisinde ihtiyaç duyulan sıcak kullanma suyunun hazırlanması için tüketilecektir.

Hastane yazın gece tarifesı periyodunda, Erzurum iklim koşulları gereği soğutma enerjisi ihtiyacı duymamaktadır. Geçiş dönemi olan Nisan ve Mayıs aylarında gece tarifesı periyodunda üretilen ısı enerjisinin kullanımı mümkün görülmemektedir. Gece tarifesı elektrik fiyatlarının uygun olması sebebiyle sistemin gecelik tarifiede getireceği kar oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra saat 22:00' den sonra gece tarifesinde sistemin çalışması, işletme saatini artıracak buda bize işletme maliyeti bakım gideri ve sistemin ömrü olarak zarar hanesinde geri dönecektir.

Erzurum Bölge Eğitim ve Araştırma Hastanesinden yıl boyunca alınmış saatlik elektrik enerjisi tüketim değerleri göz önüne alınarak, tahmin edilen Erzurum Kampüs Hastanesinin ay içerisinde ortalama günün saatlerine göre düzenlenmiş elektrik talebini karşılamak için çalışacak sistemin senaryosu aşağıdaki Çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 4.3. Ocak ayı sistemin çalışma senaryosu

Saatler	Tarife	Talep Edilen Elektrik İhtiyacı (kWh)	Çalışan Motorların Yük Oranı		Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	Tüketilen Doğal gaz Miktarı (Nm ³ /h)	Üretilen Isı Enerjisi (kWh)
			I.Motor (%)	II.Motor (%)			
06:00	gündüz	1245,85	93%	0%	1177,92	291,6	1131,46
07:00	gündüz	1578,32	0%	100%	1264	311	1199,65
08:00	gündüz	1785,86	75%	75%	1883,36	482	1919,44
09:00	gündüz	2105,66	82%	82%	2079,28	524,4	2055,82
10:00	gündüz	2328,59	91%	91%	2299,21	563	2227,56
11:00	gündüz	2487,87	93%	93%	2351,04	583,2	2262,92
12:00	gündüz	2644,21	99%	99%	2502,72	620	2379,09
13:00	gündüz	2622,21	99%	99%	2502,72	616,8	2379,09
14:00	gündüz	2685,45	95%	95%	2401,6	596	2298,28
15:00	gündüz	2682,98	95%	95%	2401,6	589,6	2298,28
16:00	gündüz	2639,99	94%	94%	2376,32	576,8	2280,60
17:00	gündüz	2585,61	92%	92%	2325,76	507,6	2245,24
18:00	puant	2210,12	79%	79%	1997,12	449,6	2000,25
19:00	puant	2067,83	69%	69%	1744,32	417,6	1810,83
20:00	puant	1939,57	64%	64%	1617,92	409,2	1712,34
21:00	puant	1786,96	62%	62%	1567,36	398	1679,98
22:00	puant	1640,27	60%	60%	1516,8	199	1641,62
23:00	gece	1584,17	100%	0%	1264	311	1199,65
00:00	gece	1465,47	0%	100%	1264	311	1199,65
01:00	gece	1206,73	89%	0%	1124,96	278,8	1094,84
02:00	gece	1149,18	0%	90%	1137,6	282	1104,94
03:00	gece	1256,41	99%	0%	1251,36	310	1189,55
04:00	gece	1275,35	0%	100%	1264	311	1199,65
05:00	gece	1328,74	100%	0%	1264	311	1199,65
TOPLAM		43083,82	20 Saat	19 Saat	42578,97	10250,2	41710,38

Çizelge 4.4. Şubat ayı sistemin çalışma senaryosu

Saatler	Tarife	Talep Edilen Elektrik İhtiyacı (kWh)	Çalışan Motorların Yük Oranı		Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	Tüketilen Doğal gaz Miktarı (Nm ³ /h)	Üretilen Isı Enerjisi (kWh)
			I.Motor (%)	II.Motor (%)			
06:00	gündüz	1117,11	0%	88%	1112,32	277,2	1084,73
07:00	gündüz	1501,91	100%	0%	1264	311	1199,65
08:00	gündüz	2013,24	79%	79%	1997,12	507,6	1999,84
09:00	gündüz	2072,05	82%	82%	2072,96	524,4	2055,86
10:00	gündüz	2188,24	86%	86%	2174,08	544,8	2129,06
11:00	gündüz	2231,47	88%	88%	2224,64	554,4	2169,46
12:00	gündüz	2472,69	98%	98%	2472,44	606,4	2358,90
13:00	gündüz	2317,81	92%	92%	2316,76	576,8	2245,24
14:00	gündüz	2340,72	93%	93%	2339,04	583,2	2262,92
15:00	gündüz	2338,59	93%	93%	2337,04	583,2	2262,92
16:00	gündüz	2297,30	91%	91%	2290,48	570,4	2227,56
17:00	gündüz	2268,51	90%	90%	2267,22	564	2209,88
18:00	puant	2051,96	81%	81%	2047,68	519,2	2038,20
19:00	puant	1792,80	71%	71%	1794,88	461,2	1848,72
20:00	puant	1671,36	66%	66%	1668,48	430,4	1750,22
21:00	puant	1507,27	60%	60%	1506,81	398	1641,62
22:00	puant	1672,20	66%	66%	1668,48	424	1750,22
23:00	gece	1301,22	0%	100%	1264	311	1199,65
00:00	gece	1344,45	100%	0%	1264	311	1199,65
01:00	gece	1247,71	0%	99%	1241,36	308,4	1189,54
02:00	gece	1072,48	85%	0%	1071,43	270	1054,43
03:00	gece	1195,79	0%	95%	1194,86	298	1149,14
04:00	gece	1215,45	96%	0%	1213,44	300,6	1159,24
05:00	gece	1294,22	0%	100%	1264	311	1199,65
TOPLAM		42526,55	19 saat	20 saat	42067,52	10546,2	41386,3

Çizelge 4.5. Mart ayı sistemin çalışma senaryosu

Saatler	Tarife	Talep Edilen Elektrik İhtiyacı (kWh)	Çalışan Motorların Yük Oranı		Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	Tüketilen Doğal gaz Miktarı (Nm ³ /h)	Üretilen Isı Enerjisi (kWh)
			I.Motor (%)	II.Motor (%)			
06:00	gündüz	1036,048	82%	0%	1036,48	262,2	1027,93
07:00	gündüz	1392,91	0%	100%	1264	311	1199,65
08:00	gündüz	1867,13	73%	73%	1845,44	471,6	1884,08
09:00	gündüz	2014,42	79%	79%	1997,12	507,6	1999,84
10:00	gündüz	2129,44	84%	84%	2123,52	534,8	2091,22
11:00	gündüz	2169,52	85%	85%	2148,8	540	2108,86
12:00	gündüz	2307,76	91%	91%	2300,48	570,4	2227,56
13:00	gündüz	2271,38	89%	89%	2249,92	559,2	2189,66
14:00	gündüz	2199,88	87%	87%	2199,36	549,6	2149,26
15:00	gündüz	2201,90	87%	87%	2199,36	549,6	2149,26
16:00	gündüz	2268,89	87%	87%	2199,36	549,6	2149,26
17:00	gündüz	2232,91	88%	88%	2224,64	554,4	2149,26
18:00	puant	2097,26	83%	83%	2098,24	529,6	2073,54
19:00	puant	1804,26	71%	71%	1794,88	461,2	1848,72
20:00	puant	1787,47	70%	70%	1769,6	456	1831,04
21:00	puant	1415,59	100%	0%	1264	311	1199,65
22:00	puant	1588,12	100%	0%	1264	311	1199,65
23:00	gece	1293,80	0%	100%	1264	311	1199,65
00:00	gece	1120,54	88%	0%	1112,32	277,2	1084,73
01:00	gece	1179,13	0%	93%	1175,52	291,6	1131,46
02:00	gece	1039,16	82%	0%	1036,48	262,2	1027,93
03:00	gece	1174,84	0%	93%	1175,52	291,6	1131,46
04:00	gece	1217,91	96%	0%	1213,44	300,6	1159,24
05:00	gece	1298,94	0%	100%	1264	311	1199,65
TOPLAM		41109,2	19 saat	20 saat	40220,48	10074	39412,56

Çizelge 4.6. Nisan ayı sistemin çalışma senaryosu

Saatler	Tarife	Talep Edilen Elektrik İhtiyacı (kWh)	Çalışan Motorların Yük Oranı		Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	Tüketilen Doğal gaz Miktarı (Nm ³ /h)	Üretilen Isı Enerjisi (kWh)
			I.Motor (%)	II.Motor (%)			
06:00	gündüz	1089,12	0%	86%	1087,04	272,4	1064,53
07:00	gündüz	1421,45	100%	0%	1264	311	1199,65
08:00	gündüz	1854,56	73%	73%	1845,44	471,6	1884,21
09:00	gündüz	1968,75	77%	77%	1946,56	494,8	1959,42
10:00	gündüz	2075,48	82%	82%	2072,96	524,4	2055,86
11:00	gündüz	2184,36	86%	86%	2174,08	544,8	2129,06
12:00	gündüz	2348,15	92%	92%	2325,76	576,8	2245,24
13:00	gündüz	2176,18	86%	86%	2174,08	544,8	2129,06
14:00	gündüz	2189,54	86%	86%	2174,08	544,8	2129,06
15:00	gündüz	2265,45	89%	89%	2249,92	559,2	2189,66
16:00	gündüz	2237,14	88%	88%	2224,64	554,4	2169,46
17:00	gündüz	2248,34	88%	88%	2224,64	554,4	2169,46
18:00	puant	2145,79	84%	84%	2123,52	534,8	2091,22
19:00	puant	1924,36	76%	76%	1921,28	488,4	1939,20
20:00	puant	1829,37	72%	72%	1820,16	466,4	1866,40
21:00	puant	1337,89	0%	100%	1264	311	1199,65
22:00	puant	1248,97	98%	0%	1238,72	303,2	1179,45
23:00	gece	1087,56	0%	0%	0	0	0
00:00	gece	956,23	0%	0%	0	0	0
01:00	gece	948,71	0%	0%	0	0	0
02:00	gece	896,64	0%	0%	0	0	0
03:00	gece	925,14	0%	0%	0	0	0
04:00	gece	945,25	0%	0%	0	0	0
05:00	gece	1056,34	0%	0%	0	0	0
TOPLAM		39360,77	15 Saat	15 Saat	32130,88	8057,2	31600,59

Çizelge 4.7. Mayıs ayı sistemin çalışma senaryosu

Saatler	Tarife	Talep Edilen Elektrik İhtiyacı (kWh)	Çalışan Motorların Yük Oranı		Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	Tüketilen Doğal gaz Miktarı (Nm ³ /h)	Üretilen Isı Enerjisi (kWh)
			I.Motor (%)	II.Motor (%)			
06:00	gündüz	1131,87	89%	0%	1124,96	279,6	1094,83
07:00	gündüz	1521,72	0%	100%	1264	311	1199,65
08:00	gündüz	2039,83	80%	80%	2022,4	514	2020,46
09:00	gündüz	2180,72	86%	86%	2174,08	544,8	2129,06
10:00	gündüz	2217,53	87%	87%	2199,36	549,6	2149,26
11:00	gündüz	2260,97	89%	89%	2249,92	583,2	2189,66
12:00	gündüz	2302,72	91%	91%	2300,48	570,4	2227,56
13:00	gündüz	2244,72	89%	89%	2249,92	559,2	2189,66
14:00	gündüz	2266,33	87%	87%	2199,36	549,6	2149,26
15:00	gündüz	2364,25	87%	87%	2199,36	549,6	2149,26
16:00	gündüz	2332,52	89%	89%	2249,92	559,2	2189,66
17:00	gündüz	2293,16	88%	88%	2224,64	554,4	2169,46
18:00	puant	2250,02	83%	83%	2098,24	529,6	2073,54
19:00	puant	2191,12	71%	71%	1794,88	461,2	1848,72
20:00	puant	1969,71	70%	70%	1769,6	456	1831,04
21:00	puant	1405,58	100%	0%	1264	311	1199,65
22:00	puant	1370,51	0%	100%	1264	311	1199,65
23:00	gece	1067,42	0%	0%	0	0	0
00:00	gece	937,96	0%	0%	0	0	0
01:00	gece	922,11	0%	0%	0	0	0
02:00	gece	937,72	0%	0%	0	0	0
03:00	gece	946,40	0%	0%	0	0	0
04:00	gece	983,26	0%	0%	0	0	0
05:00	gece	962,24	0%	0%	0	0	0
TOPLAM		41099,9	15 Saat	15 Saat	32649,12	8193,4	32010,38

Çizelge 4.8. Haziran ayı sistemin çalışma senaryosu

Saatler	Tarife	Talep Edilen Elektrik İhtiyacı (kWh)	Çalışan Motorların Yük Oranı		Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	Tüketilen Doğal gaz Miktarı (Nm ³ /h)	Üretilen Soğ. Enerjisi (kWh)
			I.Motor (%)	II.Motor (%)			
06:00	gündüz	1194,928	94%	0%	1188,16	294,8	910,47
07:00	gündüz	1540,968	0%	100%	1264	311	974,11
08:00	gündüz	2133,68	84%	84%	2123,52	534,8	1635,44
09:00	gündüz	2305,646	91%	91%	2300,48	570,4	1767,90
10:00	gündüz	2428,059	96%	96%	2426,88	601,2	1860,54
11:00	gündüz	2487,87	98%	98%	2477,44	611,6	1860,54
12:00	gündüz	2544,921	100%	100%	2528	622	1948,22
13:00	gündüz	2622,221	100%	100%	2528	622	1948,22
14:00	gündüz	2645,545	100%	100%	2528	622	1948,22
15:00	gündüz	2682,598	100%	100%	2528	622	1948,22
16:00	gündüz	2639,299	100%	100%	2528	622	1948,22
17:00	gündüz	2515,617	99%	99%	2502,72	616,8	1926,30
18:00	puant	2210,123	87%	87%	2199,36	549,6	1692,06
19:00	puant	2207,474	71%	71%	1794,88	461,2	1409,26
20:00	puant	1981,074	70%	70%	1769,6	456	1391,58
21:00	puant	1325,292	100%	0%	1264	311	974,11
22:00	puant	1282,11	0%	100%	1264	311	974,11
23:00	gece	1189,542	0%	0%	0		0
00:00	gece	1047,748	0%	0%	0		0
01:00	gece	996,118	0%	0%	0		0
02:00	gece	946,16	0%	0%	0		0
03:00	gece	895,871	0%	0%	0		0
04:00	gece	964,802	0%	0%	0		0
05:00	gece	971,131	0%	0%	0		0
TOPLAM		43758,8	15 Saat	15 Saat	35215,04	8739,4	27117,52

Çizelge 4.9. Temmuz ayı sistemin çalışma senaryosu

Saatler	Tarife	Talep Edilen Elektrik İhtiyacı (kWh)	Çalışan Motorların Yük Oranı		Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	Tüketilen Doğal gaz Miktarı (Nm ³ /h)	Üretilen Soğ. Enerjisi (kWh)
			I.Motor (%)	II.Motor (%)			
06:00	gündüz	1245,85	98%	0%	1238,72	305,8	952,16
07:00	gündüz	1578,32	0%	100%	1264	311	974,11
08:00	gündüz	2285,86	90%	90%	2275,2	564	1750,22
09:00	gündüz	2517,77	99%	99%	2502,72	616,8	1926,30
10:00	gündüz	2536,54	100%	100%	2528	622	1948,22
11:00	gündüz	2586,68	100%	100%	2528	622	1948,22
12:00	gündüz	2634,43	100%	100%	2528	622	1948,22
13:00	gündüz	2668,98	100%	100%	2528	622	1948,22
14:00	gündüz	2649,68	100%	100%	2528	622	1948,22
15:00	gündüz	2697,58	100%	100%	2528	622	1948,22
16:00	gündüz	2640,88	100%	100%	2528	622	1948,22
17:00	gündüz	2565,92	100%	100%	2528	622	1948,22
18:00	puant	2526,82	100%	100%	2528	622	1948,22
19:00	puant	2067,84	81%	81%	2047,68	519,2	1581,74
20:00	puant	1999,57	79%	79%	1997,12	507,6	1545,08
21:00	puant	1386,96	100%	0%	1264	311	974,11
22:00	puant	1240,67	0%	98%	1238,72	303,2	952,19
23:00	gece	1184,17	0%	0%	0	0	0
00:00	gece	965,77	0%	0%	0	0	0
01:00	gece	1006,43	0%	0%	0	0	0
02:00	gece	949,18	0%	0%	0	0	0
03:00	gece	856,91	0%	0%	0	0	0
04:00	gece	975,35	0%	0%	0	0	0
05:00	gece	1028,17	0%	0%	0	0	0
TOPLAM		44795,44	15 Saat	15 Saat	36580,16	9036,6	28189,89

Çizelge 4.10. Ağustos ayı sistemin çalışma senaryosu

Saatler	Tarife	Talep Edilen Elektrik İhtiyacı (kWh)	Çalışan Motorların Yük Oranı		Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	Tüketilen Doğal gaz Miktarı (Nm ³ /h)	Üretilen Soğ. Enerjisi (kWh)
			I.Motor (%)	II.Motor (%)			
06:00	gündüz	1258,30	100%	0%	1264	311	974,11
07:00	gündüz	1594,10	0%	100%	1264	311	974,11
08:00	gündüz	2308,74	91%	91%	2300,48	570,4	1767,79
09:00	gündüz	2542,94	100%	100%	2528	622	1948,22
10:00	gündüz	2561,90	100%	100%	2528	622	1948,22
11:00	gündüz	2612,51	100%	100%	2528	622	1948,22
12:00	gündüz	2660,78	100%	100%	2528	622	1948,22
13:00	gündüz	2695,67	100%	100%	2528	622	1948,22
14:00	gündüz	2676,12	100%	100%	2528	622	1948,22
15:00	gündüz	2724,13	100%	100%	2528	622	1948,22
16:00	gündüz	2667,29	100%	100%	2528	622	1948,22
17:00	gündüz	2591,57	100%	100%	2528	622	1948,22
18:00	puant	2551,84	100%	100%	2528	622	1948,22
19:00	puant	2088,51	82%	82%	2072,96	524,4	1599,64
20:00	puant	2019,51	79%	79%	1997,12	507,6	1545,08
21:00	puant	1400,81	100%	0%	1264	311	974,11
22:00	puant	1253,03	0%	99%	1251,36	308,4	963,15
23:00	gece	1195,95	0%	0%	0	0	0
00:00	gece	975,40	0%	0%	0	0	0
01:00	gece	1016,53	0%	0%	0	0	0
02:00	gece	958,69	0%	0%	0	0	0
03:00	gece	865,50	0%	0%	0	0	0
04:00	gece	985,10	0%	0%	0	0	0
05:00	gece	1038,45	0%	0%	0	0	0
TOPLAM		45243,42	15 Saat	15 Saat	36693,92	9063,8	28280,19

Çizelge 4.11. Eylül ayı sistemin çalışma senaryosu

Saatler	Tarife	Talep Edilen Elektrik İhtiyacı (kWh)	Çalışan Motorların Yük Oranı		Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	Tüketilen Doğal gaz Miktarı (Nm ³ /h)	Üretilen Soğ. Enerjisi (kWh)
			I.Motor (%)	II.Motor (%)			
06:00	gündüz	1143,19	90%	0%	1137,6	282	875,11
07:00	gündüz	1536,97	0%	100%	1264	311	974,11
08:00	gündüz	2060,23	81%	81%	2047,68	519,2	1581,74
09:00	gündüz	2202,54	87%	87%	2199,36	549,6	1692,06
10:00	gündüz	2239,32	88%	88%	2224,64	554,4	1711,42
11:00	gündüz	2283,55	90%	90%	2275,2	564	1750,22
12:00	gündüz	2325,74	92%	92%	2325,76	576,8	1785,58
13:00	gündüz	2266,91	89%	89%	2249,92	559,4	1730,78
14:00	gündüz	2289,02	90%	90%	2275,2	564	1750,22
15:00	gündüz	2387,84	94%	94%	2376,32	589,6	1820,94
16:00	gündüz	2355,82	93%	93%	2351,04	583,2	1803,26
17:00	gündüz	2316,12	91%	91%	2300,48	570,4	1767,90
18:00	puant	2272,54	89%	89%	2249,92	559,2	1730,78
19:00	puant	2213,03	87%	87%	2199,36	549,6	1692,06
20:00	puant	1989,39	78%	78%	1971,84	501,2	1526,18
21:00	puant	1419,63	100%	0%	1264	311	974,11
22:00	puant	1384,24	0%	100%	1264	311	974,11
23:00	gece	1078,10	0%	0%	0	0	0
00:00	gece	947,55	0%	0%	0	0	0
01:00	gece	931,31	0%	0%	0	0	0
02:00	gece	947,16	0%	0%	0	0	0
03:00	gece	955,86	0%	0%	0	0	0
04:00	gece	993,17	0%	0%	0	0	0
05:00	gece	971,24	0%	0%	0	0	0
TOPLAM		41519,90	15 Saat	15 Saat	33976,32	8455,6	26140,58

Çizelge 4.12. Ekim ayı sistemin çalışma senaryosu

Saatler	Tarife	Talep Edilen Elektrik İhtiyacı (kWh)	Çalışan Motorların Yük Oranı		Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	Tüketilen Doğal gaz Miktarı (Nm ³ /h)	Üretilen Soğ. Enerjisi (kWh)
			I.Motor (%)	II.Motor (%)			
06:00	gündüz	1100,12	87%	0%	1099,68	274,8	846,03
07:00	gündüz	1435,68	0%	100%	1264	311	974,11
08:00	gündüz	1873,06	74%	74%	1870,72	476,8	1454,26
09:00	gündüz	1988,38	78%	78%	1971,84	501,2	1526,38
10:00	gündüz	2096,35	82%	82%	2072,96	524,4	1599,64
11:00	gündüz	2206,04	87%	87%	2199,36	549,6	1692,06
12:00	gündüz	2371,62	93%	93%	2351,04	583,2	1803,26
13:00	gündüz	2197,92	86%	86%	2174,08	544,8	1672,70
14:00	gündüz	2211,43	87%	87%	2199,36	549,6	1692,06
15:00	gündüz	2288,15	90%	90%	2275,2	564	1750,22
16:00	gündüz	2259,11	89%	89%	2249,92	559,2	1730,78
17:00	gündüz	2270,83	89%	89%	2249,92	559,2	1730,78
18:00	puant	2167,28	85%	85%	2148,8	540	1653,34
19:00	puant	1943,64	76%	76%	1921,28	488,4	1488,98
20:00	puant	1847,64	73%	73%	1845,44	471,6	1438,26
21:00	puant	1351,69	100%	0%	1264	311	974,11
22:00	puant	1261,46	0%	100%	1264	311	974,11
23:00	gece	1098,46	0%	0%	0	0	0
00:00	gece	965,73	0%	0%	0	0	0
01:00	gece	958,11	0%	0%	0	0	0
02:00	gece	905,64	0%	0%	0	0	0
03:00	gece	934,34	0%	0%	0	0	0
04:00	gece	954,75	0%	0%	0	0	0
05:00	gece	1066,90	0%	0%	0	0	0
TOPLAM		39754,38	15 Saat	15 Saat	32421,6	8119,8	25001,08

Çizelge 4.13. Kasım ayı sistemin çalışma senaryosu

Saatler	Tarife	Talep Edilen Elektrik İhtiyacı (kWh)	Çalışan Motorların Yük Oranı		Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	Tüketilen Doğal gaz Miktarı (Nm ³ /h)	Üretilen Isı Enerjisi (kWh)
			I.Motor (%)	II.Motor (%)			
06:00	gündüz	1306,87	100%	0%	1264	311	1199,65
07:00	gündüz	1666,37	0%	100%	1264	311	1199,65
08:00	gündüz	1958,34	77%	77%	1946,56	494,8	1959,42
09:00	gündüz	2111,01	83%	83%	2098,24	529,6	2073,54
10:00	gündüz	2150,73	85%	85%	2148,8	540	2108,86
11:00	gündüz	2295,12	90%	90%	2275,2	564	2209,88
12:00	gündüz	2386,45	94%	94%	2376,32	589,6	2280,60
13:00	gündüz	2294,94	90%	90%	2275,2	564	2209,88
14:00	gündüz	2221,84	87%	87%	2199,36	549,6	2149,26
15:00	gündüz	2223,28	87%	87%	2199,36	549,6	2149,26
16:00	gündüz	2291,59	90%	90%	2275,2	564	2209,26
17:00	gündüz	2255,41	89%	89%	2249,92	559,2	2189,66
18:00	puant	2118,24	83%	83%	2098,24	529,6	2073,54
19:00	puant	1975,36	78%	78%	1971,84	501,2	1979,64
20:00	puant	1867,98	73%	73%	1845,44	471,6	1884,08
21:00	puant	1429,74	100%	0%	1264	311	1199,65
22:00	puant	1604,09	0%	100%	1264	311	1199,65
23:00	gece	1306,74	100%	0%	1264	311	1199,65
00:00	gece	1131,79	0%	89%	1124,96	279,6	1094,83
01:00	gece	1190,95	94%	0%	1188,16	294,8	1140,30
02:00	gece	1265,45	0%	100%	1264	311	1199,65
03:00	gece	1186,51	93%	0%	1175,52	291,6	1131,46
04:00	gece	1230,09	0%	97%	1226,08	303,2	1169,34
05:00	gece	1311,37	100%	0%	1264	311	1199,65
TOPLAM		42780,54	19 Saat	18 Saat	41522,4	10353	40410,36

Çizelge 4.14. Aralık ayı sistemin çalışma senaryosu

Saatler	Tarife	Talep Edilen Elektrik İhtiyacı (kWh)	Çalışan Motorların Yük Oranı		Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	Tüketilen Doğal gaz Miktarı (Nm ³ /h)	Üretilen Isı Enerjisi (kWh)
			I.Motor (%)	II.Motor (%)			
06:00	gündüz	1178,07	93%	0%	1175,52	291,6	1131,46
07:00	gündüz	1552,77	0%	100%	1264	311	1199,65
08:00	gündüz	1883,22	74%	74%	1870,72	476,8	1901,76
09:00	gündüz	2079,32	82%	82%	2072,96	524,4	2055,86
10:00	gündüz	2299,30	90%	90%	2275,2	564	2209,88
11:00	gündüz	2352,62	93%	93%	2351,04	583,2	2262,92
12:00	gündüz	2503,46	99%	99%	2502,72	616,8	2379,08
13:00	gündüz	2489,68	98%	98%	2477,44	606,4	2358,90
14:00	gündüz	2393,74	94%	94%	2376,32	589,6	2280,60
15:00	gündüz	2391,48	94%	94%	2376,32	589,6	2280,60
16:00	gündüz	2352,75	93%	93%	2351,04	583,2	2262,92
17:00	gündüz	2304,86	91%	91%	2300,48	570,4	2227,56
18:00	puant	1992,47	78%	78%	1971,84	501,2	1979,64
19:00	puant	1740,85	68%	68%	1719,04	443,2	1790,62
20:00	puant	1620,25	64%	64%	1617,92	418,8	1712,34
21:00	puant	1554,85	100%	0%	1264	311	1199,65
22:00	puant	1520,82	0%	100%	1264	311	1199,65
23:00	gece	1379,66	100%	0%	1264	311	1199,65
00:00	gece	1360,24	0%	100%	1264	311	1199,65
01:00	gece	1124,65	89%	0%	1124,96	279,6	1094,83
02:00	gece	1143,94	0%	90%	1137,6	282	1104,94
03:00	gece	1251,95	99%	0%	1251,36	308,4	1189,54
04:00	gece	1270,54	0%	100%	1264	311	1199,65
05:00	gece	1343,44	100%	0%	1264	311	1199,65
TOPLAM		43084,24	19 Saat	18 Saat	41800,48	10406,2	40621

Aylara göre oluşturulan sistem rejiminde çalışacak motorların yüküne göre teknik analizde elde edilen veriler ışığında, sistemin yıl boyunca üreteceği Elektrik enerjisi ve getirisi, ısıtma enerjisi ve getirisi, soğutma enerjisi ve getirisi ile sistemin bir yıl boyunca tüketeceği doğal gaz miktarı Çizelge 4.15’de verilmiştir.

Çizelge 4.15. Yıllık sistemin üreteceği enerji miktarları ve tüketeceği enerji miktarı

Aylar		Üretilen Elektrik Enerjisi (kW)	Üretilen Elektriğin Getirisi (TL)	Üretilen Isıtma-Soğutma Enerjisi (kW)	Üretilen Ist.-Soğ. Enrj. Getirisi (TL)	Tüketilen Yakıt Miktarı (Nm ³)	Tüketilen Yakıt Gideri (TL)
Ocak	Gündüz	792531,4	242910,874	765000/(Isıtma)	61448,52	194122	183761
	Puant	261749,1	126608,04	274195/(Isıtma)	22024,8	58075	54976
	Gece	265667,5	46013,611	253825/(Isıtma)	20388,48	65558	62060
Şubat	Gündüz	696306,8	213418,034	677768/(Isıtma)	54442,08	173695	164425
	Puant	243217,2	117644,16	252811/(Isıtma)	20307	62518	59182
	Gece	238366,5	41285,0778	228236/(Isıtma)	18333	59080	55927
Mart	Gündüz	734442,9	225106,749	723101/(Isıtma)	58083,48	184760	174900
	Puant	253912,3	122817,38	252730/(Isıtma)	20300,28	64132	60710
	Gece	255479,7	44249,084	245957/(Isıtma)	19755,96	63401	60017
Nisan	Gündüz	712896,5	218502,777	699740/(Isıtma)	56206,92	178602	169070
	Puant	251030,4	121423,404	248277/(Isıtma)	19942,44	63114	59745
	Gece	0	0	0	0	0	0
Mayıs	Gündüz	758210,4	232391,488	739591/(Isıtma)	59408,16	189862	179729
	Puant	253912,3	122817,38	252730/(Isıtma)	20300,28	64132	60710
	Gece	0	0	0	0	0	0
Haziran	Gündüz	807696	247558,824	620292/(Soğut)	54262,26	199518	188869
	Puant	248755	120322,794	193233/(Soğut)	26693,6	62664	59319
	Gece	0	0	0	0	0	0
Temmuz	Gündüz	852643,8	261335,325	656845/(Soğut)	57459,48	209981	198775
	Puant	281341,1	136084,69	217041/(Soğut)	29982,14	70153	66409
	Gece	0	0	0	0	0	0
Ağustos	Gündüz	854994,9	262055,937	658749/(Soğut)	57626,4	210502	199267
	Puant	282516,6	136653,279	217936/(Soğut)	30106,06	70475	66715
	Gece	0	0	0	0	0	0
Eylül	Gündüz	750816	230125,104	577300/(Soğut)	50501,1	186708	176743
	Puant	268473,6	129860,68	206917/(Soğut)	28583,6	66960	63386
	Gece	0	0	0	0	0	0
Ekim	Gündüz	743320,5	227827,733	572640/(Soğut)	50093,94	185931	176008
	Puant	261749,1	126608,04	202392/(Soğut)	27958,94	65782	62271
	Gece	0	0	0	0	0	0
Kasım	Gündüz	737164,8	225941,011	718167/(Isıtma)	57687	183792	173983
	Puant	253305,6	122523,919	250096/(Isıtma)	20088,6	63732	60330
	Gece	255201,6	44200,9171	244046/(Isıtma)	19603,08	63066	59700
Aralık	Gündüz	787206,6	241278,823	761086/(Isıtma)	61134,36	195517	185082
	Puant	242940,8	117510,465	244338/(Isıtma)	19626,6	61541	58256
	Gece	265667,5	46013,611	253825/(Isıtma)	20388,48	65534	62036
Toplam			4.551.089		1062737		3.202.361

4.3. Trijenerasyon Sisteminin Ekonomik Analizi Sonucu Elde Edilen Bulgular

4.3.1. Keşif özeti nin çıkarılması

Mekanik işler

- Gaz motoru, (yardımcı ve kontrol üniteleri dahil)
- Atık ısı geri kazanım sistemi (sıcak su üretimi),
- Motor soğutma radyatörü
- Soğutma kulesi
- Absorpsiyonlu çiller
- Egzoz- Baca Katalitik Konvektör
- Borulama montaj ve devreye alma

Elektrik İşleri

- Generatör seti
- Elektronik kontrol panosu
- Alçak ve orta gerilim sistemi
- Generatör, koruma ve kumanda panosu ile senkronizasyon sistemi
- Step-up trafo ve OG sistemi
- Otomasyon ve SCADA sistemi
- Kablolama, montaj ve devreye alma

İnşaat işleri

- Trijenerasyon binasının inşa edilmesi

Toplam: 1.440.000 € (euro) (GE Jenbacher verisi)

4.3.2. Sistem için yıllık sabit masrafların belirlenmesi

4.3.2.a. Amortisman maliyeti

Yıllık sermaye maliyeti (amortisman) için yıllık faiz oranı $i = \%8$ ve işletme ömrü 20 yıl alınmıştır. Yatırımın şimdiki değeri $I = 1.440.000 \text{ €} = 3.686.000 \text{ TL}$ ($1\text{€} = 2,56 \text{ TL}$) alındı.

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

$$C_K = 3.686.000 \left[\frac{0,08(1 + 0,08)^{20}}{(1 + 0,08)^{20} - 1} \right]$$

$$C_K = 375.416 (\text{TL/yıl})$$

4.3.2.b. Sigorta maliyeti

Yangın, yıldırım, infilak, terör primi olarak: $I * \%0,5 = 3.686.000 * 0,005 = 18.430 \text{ TL}$

Deprem primi olarak : $I * \%0,33 = 3.686.000 * 0,0033 = 12.163 \text{ TL}$

Toplam sabit Masraflar: 406.009 TL dir.

4.3.3. Sistem için yıllık değişen masrafların belirlenmesi

4.3.3.a. Yakıt giderleri

Sistemin bir yıl boyunca aylara göre düzenlenmiş yakacağı yakıt miktarı ile Erzurum gaz dağıtım şirketi Palen A.Ş.'nin 2013 Haziran dönemine ait 300.000 Sm^3 üstü

tüketicilere uyguladığı fiyat baz alınarak hesaplanmış aylık yakıt tüketim tutarlarına ait Çizelge 4.16’da verilmiştir.

Çizelge 4.16. Sistemin aylara göre düzenlenmiş tüketeceği yakıt miktarı ve tutarı

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam
Tüketilen Yakıt Miktarı (Nm ³)	317755	295293	312293	241716	253994	262182	280134	280977	253668	251713	310590	322592	3.382.907
Tüketilen Yakıt Tutarı (TL)	300.797	279.534	295.627	228.815	240.439	248.188	265.184	265.982	240.129	238.279	294.013	305.374	3.202.361

4.3.3.b. İşçilik giderleri

Sistemin aylara göre çalıştırılmasında oluşacak işçilik giderleri Çizelge 4.17’de verilmiştir.

Çizelge 4.17. Sistemin aylara göre düzenlenmiş işçilik maliyetleri

	Ocak 3 vardiya	Şubat 3 vardiya	Mart 3 vardiya	Nisan 2 vardiya	Mayıs 2 vardiya	Haziran 2 vardiya	Temmuz 2 vardiya	Ağustos 2 vardiya	Eylül 2 vardiya	Ekim 2 vardiya	Kasım 3 vardiya	Aralık 3 vardiya	Toplam
İşçilik Maliyetleri Tutarı (TL)	28.500	28.500	28.500	19.000	19.000	19.000	19.000	19.000	19.000	19.000	28.500	28.500	275.500

4.3.3.c. Tamir ve bakım giderleri

Sistemin ağır bakım periyoduna kadar yıllara göre oluşacak bakım giderleri Çizelge 4.18’de verilmiştir.

Çizelge 4.18. Ağır bakım süresine kadar bulunan sistemin bakım masrafları

DÖNEM	SARF MALZEME (TL)	YAĞ DEĞİŞİMİ (TL)	İŞÇİLİK (TL)	TOPLAM (TL)
1. YIL	53.452	13.952	9.680	77.084
2. YIL	53.452	13.952	9.680	77.084
3. YIL	202.092	13.952	29.760	245.804
4. YIL	53.452	13.952	9.680	77.084
5. YIL	160.292	13.952	25.000	199.244
6. YIL	95.252	13.952	14.440	123.644
7. YIL	160.292	13.952	25.000	199.244
8. YIL	53.452	13.952	9.680	77.084
9. YIL	202.092	13.952	29.760	245.804
10. YIL	1.150.192	13.952	75.130	1.239.274
ANA BAKIM DAHİL TOPLAM (TL)	2.184.020	139.520	237.810	2.561.350
ANA BAKIM HARİÇ TOPLAM (TL)	1.033.828	125.568	162.680	1.322.076

Ağır bakım dahil ortalama Yıllık bakım gideri: 256.135 TL olmaktadır (General Elektrik verileri).

4.3.3.d. Yağlama gideri

Gaz motorlarının çalışma süresine göre belirlenmiş Sistemin aylık tüketeceği yağlama yağı miktarı ve hesaplanan tutarı Çizelge 4.19’da verilmiştir.

Çizelge 4.19. Gaz motorlarının çalışma süresine göre sistemin tüketeceği yağ miktarı ve tutarı

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Agustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam
Motorların Çalışma Süresi (saat)	1208	1092	1210	900	930	900	930	930	900	930	1110	1110	12150
Motorların Yağ Tüketimi (kg)	555,68	502,32	556,6	414	427,8	414	427,8	427,8	414	427,8	510,6	510,6	5.589
Tüketilen Yağın Fiyatı (TL)	4.251	3.843	4.258	3.167	3.272	3.167	3.272	3.272	3.167	3.272	3.906	3.906	42.755

Toplam Değişen Masraflar: 3.776.771 TL

Toplam Giderler: Sabit+ Değişen Masraflar: 4.182.760 TL olarak hesaplanmıştır.

4.3.4. Gelir gider tablosu

Ağır bakım süresine kadar yıllara göre hesaplanan gelir gider tablosu Çizelge 4.20’de verilmiştir.

Çizelge 4.20. Ağır bakım süresine kadar yıllara göre düzenlenmiş gelir gider tablosu

Yıllar	1. Yıl	2. Yıl	3. Yıl	4. Yıl	5. Yıl	6. Yıl	7. Yıl	8. Yıl	9. Yıl	10. Yıl
Net Elektrik Enerjisi Üretimi (kW)	12.898.620	12.898.620	12.898.620	12.898.620	12.898.620	12.898.620	12.898.620	12.898.620	12.898.620	12.898.620
Net Isıtma Enerjisi Üretimi (kW)	8.085.519	8.085.519	8.085.519	8.085.519	8.085.519	8.085.519	8.085.519	8.085.519	8.085.519	8.085.519
Net Soğutma Enerjisi Üretimi (kW)	4.123.345	4.123.345	4.123.345	4.123.345	4.123.345	4.123.345	4.123.345	4.123.345	4.123.345	4.123.345
Doğal Gaz Tüketimi (Nm ³)	3.382.907	3.382.907	3.382.907	3.382.907	3.382.907	3.382.907	3.382.907	3.382.907	3.382.907	3.382.907
Yağlama Yağı SAE 40 Tüketimi (Kg)	5.582	5.582	5.582	5.582	5.582	5.582	5.582	5.582	5.582	5.582
Doğal Gaz Fiyatı (TL/Nm ³)	0,94663	0,94663	0,94663	0,94663	0,94663	0,94663	0,94663	0,94663	0,94663	0,94663
Yağlama Yağı Fiyatı (TL/Kg)	7,65	7,65	7,65	7,65	7,65	7,65	7,65	7,65	7,65	7,65
İŞLETME GELİRLERİ (TL)										
Üretilen Elektrik Enerjisi Geliri (TL)	4.551.089	4.551.089	4.551.089	4.551.089	4.551.089	4.551.089	4.551.089	4.551.089	4.551.089	4.551.089
Üretilen Isıtma Enerjisi Geliri (TL)	649.470	649.470	649.470	649.470	649.470	649.470	649.470	649.470	649.470	649.470
Üretilen Soğutma Enerjisi Geliri (TL)	413.267	413.267	413.267	413.267	413.267	413.267	413.267	413.267	413.267	413.267
TOPLAM GELİRLER (TL)	5.613.826	5.613.826	5.613.826	5.613.826	5.613.826	5.613.826	5.613.826	5.613.826	5.613.826	5.613.826
İŞLETME GİDERLERİ (TL)										
Doğal Gaz Giderleri (TL)	3.202.361	3.202.361	3.202.361	3.202.361	3.202.361	3.202.361	3.202.361	3.202.361	3.202.361	3.202.361
Yağlama Yağı Giderleri (TL)	42.755	42.755	42.755	42.755	42.755	42.755	42.755	42.755	42.755	42.755
Bakım Giderleri (TL)	77.084	77.084	245.804	77.084	199.244	123.644	199.244	77.084	245.804	1.239.274
İşçilik Giderleri (TL)	275.500	275.500	275.500	275.500	275.500	275.500	275.500	275.500	275.500	275.500
Tesis Sigortası (TL)	30.593	30.593	30.593	30.593	30.593	30.593	30.593	30.593	30.593	30.593
Amortisman Gideri (TL)	375.416	375.416	375.416	375.416	375.416	375.416	375.416	375.416	375.416	375.416
TOPLAM GİDERLER (TL)	4.003.709	4.003.709	4.172.429	4.003.709	4.125.869	4.050.269	4.125.869	4.003.709	4.172.429	5.165.899
PROJE KAZANCI (TL)										
Toplam İşletme Gelirleri (TL)	5.613.826	5.613.826	5.613.826	5.613.826	5.613.826	5.613.826	5.613.826	5.613.826	5.613.826	5.613.826
Toplam İşletme Giderleri (TL)	4.003.709	4.003.709	4.172.429	4.003.709	4.125.869	4.050.269	4.125.869	4.003.709	4.172.429	5.165.899
İŞLETMENİN NET KAZANCI (TL)	1.610.117	1.610.117	1.441.397	1.610.117	1.487.957	1.563.557	1.487.957	1.610.117	1.441.397	447.927

4.3.5. Sistemin geri ödeme süresinin belirlenmesi

Gelir gider tablosundan tesisin ortalama yıllık net karı, 1.430.666 TL olarak hesaplanmıştır.

Tesisin ilk yatırım maliyeti ise **1.440.000 € (euro)** (GE Jenbacher verisi)

26.07.2013 tarihi baz alınarak Euro kuru 2.554 TL kabulüyle, tesisin ilk yatırım maliyeti, 3.653.920 TL dir.

Tesisin geri ödeme süresi 20 yıl ve faiz oranı %8 kabul edilmiştir. Buna göre tesisin dinamik geri ödeme süresi,

$$t_g = 20(\text{Yıl})$$

$$G_i = 1.430.666 \text{ (TL)}$$

$$G_y = 3.653.920 \text{ (TL)}$$

$$f = 0,08.t_g = \frac{\ln\left[\frac{1.430.666}{(1.430.666 - 3.653.920 \cdot 0,08)}\right]}{\ln(1+0,08)}$$

$$t_g = 2,9698 \text{ yıl bulunur.}$$

5. SONUÇ

Hastaneler sanayiden sonra en fazla enerji tüketimi olan yapılardır. İhtiyaç duydukları bu enerji talebi ise, yıl içerisindeki aylara, haftanın aktif ve pasif günlerine hatta gün içerisindeki saatlere göre de sürekli değişiklik gösterir. Böyle bir yapıya bileşik güç üretim sistemini adapte etmek ve oluşturulacak sistemi yılın bütün periyotlarında en yüksek verimde çalıştırmak oldukça önemli bir konudur. Aksi takdirde büyük meblağlar ödenerek yapılan yatırım atıl duruma düşebilir.

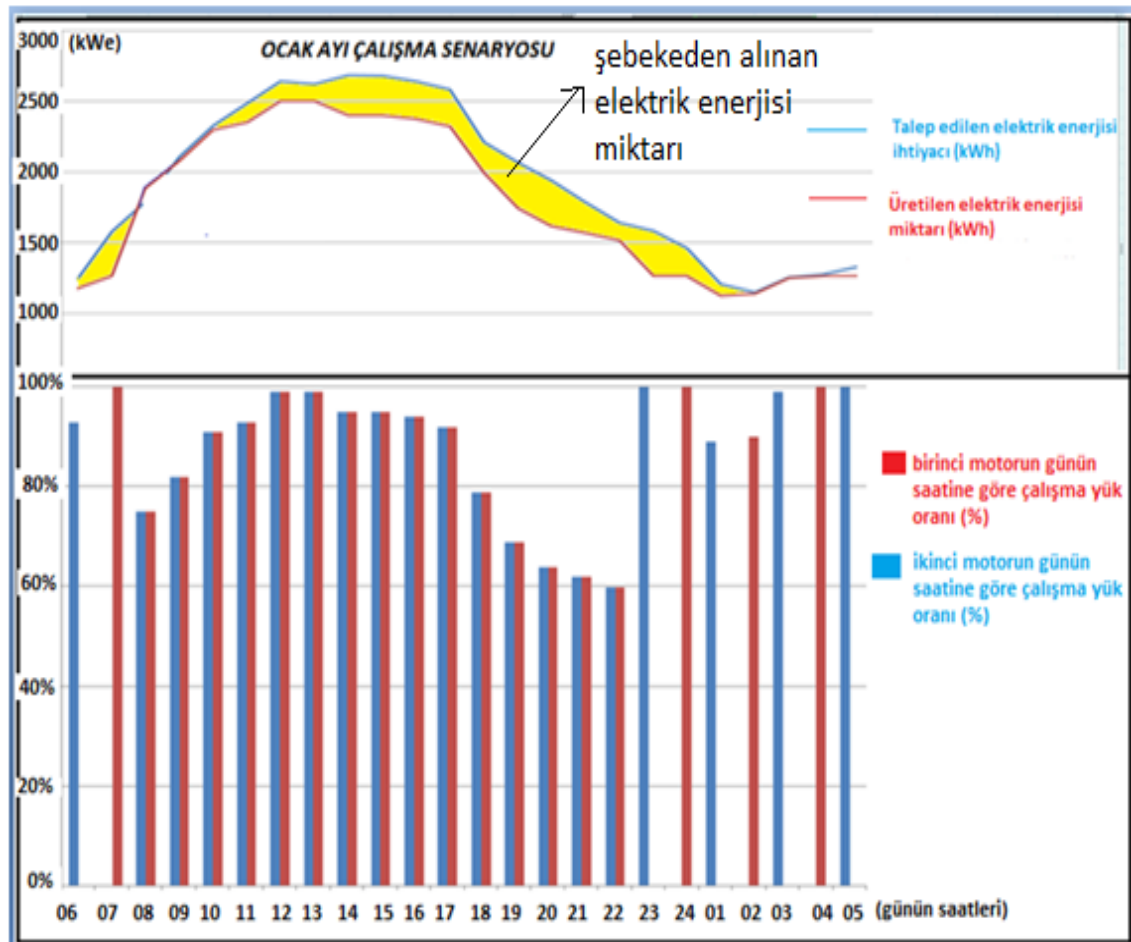
Bu yüzden sistemin en efektif şekilde çalıştırılabilmesi amacıyla, Kojenerasyon sisteminde kullanılacak güç üreticisinin çalışma sisteminin ve kapasitesinin belirlenmesi için, hastanenin yıl içerisinde talep edeceği elektrik enerjisinin çok iyi tahmin edilmesi gerekir.

Bu çalışmada yapımı planlanan Kampus hastanesinin yan tarafında hizmet veren Erzurum Bölge Eğitim ve Araştırma Hastanesinin yıl boyunca talep ettiği enerji miktarları hassasiyetle incelenmiş ve bu veriler ışığında ortalama değerler baz alınarak yapılacak Kampus Hastanesinin enerji talebinin ne olacağı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Kojenerasyon sisteminde kullanılacak güç üreticisinin çalışma sisteminin tayininde ise, türbin sistemlerinin gerekli elektrik gücüne göre kurulumunun çok pahalı oluşu, işletme bakım maliyetleri ve çalışma şartları da (ilk çalıştırma, değişken yüklerde kullanım performansı v.s.) dikkate alınarak doğalgaz motorlu kojenerasyon sistemlerinin tercih edilmesinin uygun olacağı görülmüş ve sistem tasarımında aylara göre oluşturulan hastanenin enerji talebinde en yüksek ve en düşük enerji ihtiyacının, en yüksek verimde sistem tarafından karşılanabilmesi için ise güç üreticisinin kas kat çalışan iki motordan oluşmasına karar verilmiştir.

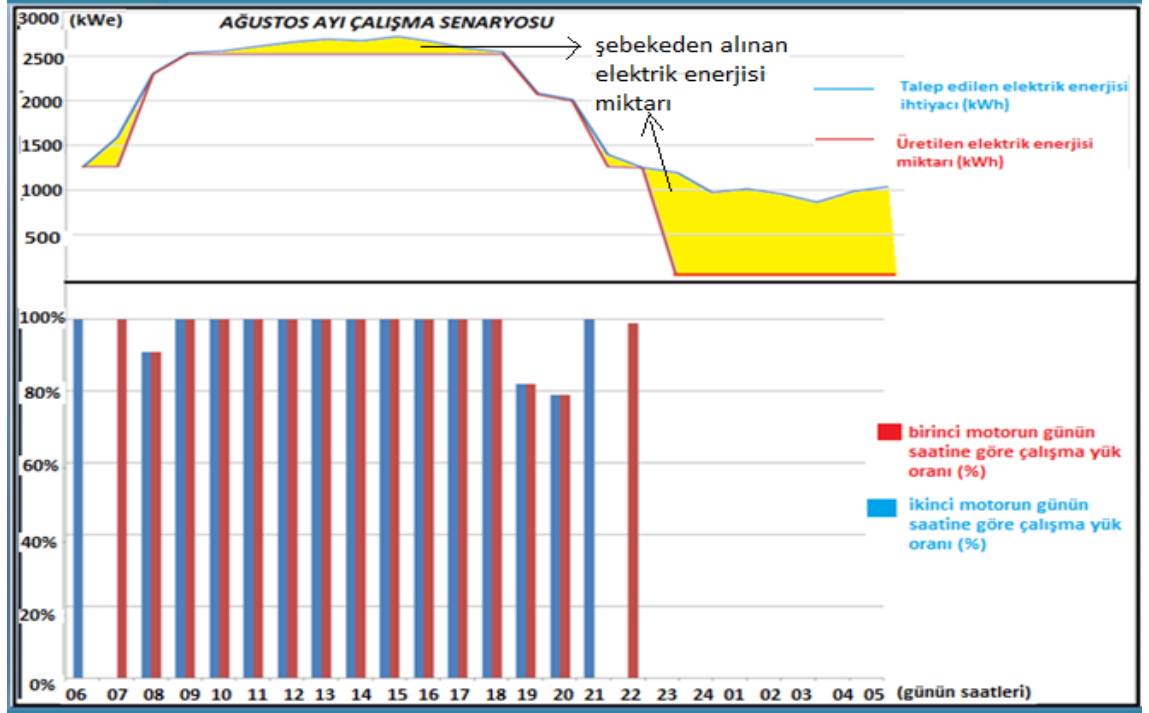
Söz konusu hastanenin inşa edileceği konumun tüm fiziki şartları (rakım sıcaklık gibi) göz önüne alınarak, belirlenmiş çalışma rejimini en efektif şekilde sağlayacak kojenerasyon sisteminin gaz motoruna yapılan matematik modeliyle; saatlik hangi yükte

çalışacağı, ne kadar yakıt yakacağı ve oluşturacağı atık ısı enerjisi miktarı bulunmuştur. Bulunan atık ısı enerjisi miktarının ne ölçüde faydalı ısı enerjisine dönüşebileceği ise yapılan atık ısı kazanı modeli ile hesaplanmıştır. Hastanenin yaz periyodunda atık ısı kazanında üretilen faydalı ısı enerjisini soğutma enerjisine çevirecek olan absorpsiyonlu soğutma sistemi üzerine yapılan matematik modeli sayesinde ise, çalışacak gaz motorunun değişen yüküne göre sistemden elde edilen ısı enerjisinin ne kadarının soğutma enerjisine dönüştürülebildiği belirlenmiştir.

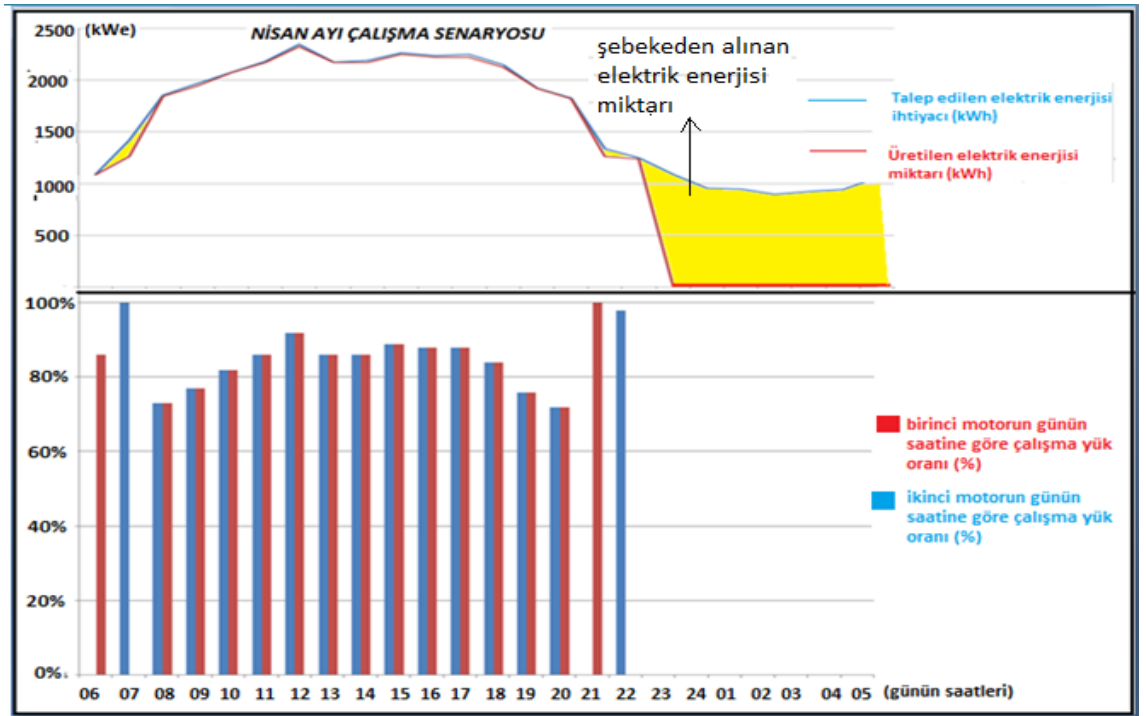
Hastanenin en yüksek ihtiyaç talebinin olacağı Ocak ve Ağustos ayları için Şekil 5.1 ve 5.2’de; hastanenin en düşük ihtiyaç talebinin olacağı Nisan ayı için ise Şekil 5.3’de sistemin çalışma senaryoları gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Sistemin Ocak ayında tahmin edilen çalışma senaryosu



Şekil 5.2. Sistemin Ağustos ayında tahmin edilen çalışma senaryosu



Şekil 5.3. Sistemin Nisan ayında tahmin edilen çalışma senaryosu

Oluşturulan sistemin matematik modeline göre;

♦ En efektif çalışma şartı olan %100 yükte kış periyodunda sistem çalıştırıldığında, üretilen 1kWe elektrik enerjisi için sistemden 0,949kW faydalı ısı enerjisi kazanıldığı bulunmuştur.

♦ %100 yükte yaz periyodunda sistem çalıştırıldığında, üretilen 1kWe elektrik enerjisi için sistemden 0,770kW soğutma enerjisi kazanıldığı hesaplanmıştır.

♦ %75 yükte kış periyodunda sistem çalıştırıldığında, üretilen 1kWe elektrik enerjisi için sistemden 1,0123kW faydalı ısı enerjisi kazanıldığı bulunmuştur.

♦ %75 yükte yaz periyodunda sistem çalıştırıldığında, üretilen 1kWe elektrik enerjisi için sistemden 0,7755kW soğutma enerjisi kazanıldığı hesaplanmıştır.

♦ %65 yükte kış periyodunda sistem çalıştırıldığında, üretilen 1kWe elektrik enerjisi için sistemden 1,0528kW faydalı ısı enerjisi kazanıldığı bulunmuştur.

♦ %65 yükte Yaz periyodunda sistem çalıştırıldığında, üretilen 1kWe elektrik enerjisi için sistemden 0,7917kW soğutma enerjisi kazanıldığı hesaplanmıştır.

♦ %50 yükte kış periyodunda sistem çalıştırıldığında, üretilen 1kWe elektrik enerjisi için sistemden 1,1489kW faydalı ısı enerjisi kazanıldığı bulunmuştur.

♦ %50 yükte yaz periyodunda sistem çalıştırıldığında, üretilen 1kWe elektrik enerjisi için sistemden 0,84098kW soğutma enerjisi kazanıldığı hesaplanmıştır.

Bu veriler ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılabilir.

1. Sistem için seçilecek gaz motoru kapasitesi belirlenirken motorun çalışma yükü değerinin %60'ın altına inilmemesi gerekliliğini göstermektedir.
2. Yaz ve geçiş dönemlerinde soğuk iklim bölgeleri için gece tarifesinde sistemin çalıştırılmaması bunun yerine ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinin şebekeden alınmasının uygun olacağı görülmüştür.
3. Soğuk iklim bölgelerinde uygulanacak sistem uygulamasında, geçiş dönemi olan Nisan, mayıs ve Ekim ayları için sistemden kazanılan atık ısının soğutma enerjisi üretimi yerine yapının ihtiyaç duyduğu sıcak kullanım suyunun hazırlanması için kullanılmasının daha doğru olacağı görülmüştür.

Yapılan sistemin matematik modellemesi ile %100 yükte sisteme 2957kWh enerji girişi olduğu buna karşı 1264 kWh elektrik enerjisi ile 1199,65kWh ısı enerjisinin elde edildiği sistemin elektriksel veriminin %42,74 ve termal verimin %40,57 olduğu, toplam verimin ise %83.31 olduğu bulunmuştur.

%75 yükte sisteme 2291,43kWh enerji girişi olduğu buna karşı 948 kWh elektrik enerjisi ile 959,72kWh ısı enerjisinin elde edildiği sistemin elektriksel veriminin %41,37 ve termal verimin %41,88 olduğu, toplam verimin ise %83.25 olduğu bulunmuştur.

%50 yükte sisteme 1673,41kWh enerji girişi olduğu buna karşı 632 kWh elektrik enerjisi ile 726,10kWh ısı enerjisinin elde edildiği sistemin elektriksel veriminin %37,76 ve termal verimin %43,39 olduğu, toplam verimin ise %81.15 olduğu bulunmuştur.

Optimum çalışma şartları göz önüne alınarak oluşturulan termoekonomik optimizasyonda sistemin tüm maliyetleri ayrıntılı olarak çıkarılmış, sistemden yıl boyunca üretilen elektrik enerjisi, ısıtma enerjisi ve soğutma enerjisinin maddi getirisi sağlanan net gelir olarak kaydedilmiştir.

Bu çalışmanın sonucunda sistemin ağır bakıma kadar olan on yıllık çalışma periyodunda gelir gider tablosu oluşturulmuştur. Bu tabloda hesaplanan proje net karının yıllık ortalama değerine ve sistemin ilk yatırım maliyetine göre hesaplanan dinamik geri ödeme süresi 2.9698 yıl bulunmuştur. Bu da sistemin karlı ve getirisinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte hastaneler kesintisiz ve stabil güç ihtiyacının verilmesi gereken riskli yapılar içerisinde. Böyle riskli bir yapıya konulacak bileşik güç üretim sistemi avantaj sağlayacaktır. Sistemin, hastanenin her an için ihtiyaç duyduğu enerjiyi kesintisiz sağlamak amacıyla konulan UPS ve Jeneratörlerle ve şebeke bağlantısı ile uyumlu bir senaryo da çalıştırılması da oldukça önem arz etmektedir.

Teknik verimliliği, güvenilirliği ve ekonomikliği dünyada kanıtlanmış olan Trijenerasyon sistemlerinin seçimi ve kullanımı çok önemlidir. Gerekli parametreler göz önüne alınmadan yapılacak olan sistem seçimleri ekonomik olmayabilir. Trijenerasyon sistemlerinde elde edilen ısı ve elektriğin tamamına yakınının kullanılması, sistemin ekonomikliğini artırıp, geri ödeme süresini kısaltmaktadır. Trijenerasyon sistemleri ile birincil enerjiden tasarruf sağlanacağından, sistemin çevreye en önemli katkılarından biri de burada ortaya çıkmaktadır. Trijenerasyon sistemleri hem enerji tasarrufu ve parasal açıdan önemli oranda kâr getiren hem de muadillerine nazaran çevreye daha duyarlı olan iyi bir enerji dönüşüm sistemleridir. Türkiye fosil kaynaklı yakıtlar ve doğalgaz bakımından dışa bağımlı bir ülkedir. Bu da İthalat kalemini yükseltmektedir. Enerji tüketim değerleri yüksek olan hastaneler için Trijenerasyon sistemlerinin kullanımının yaygınlaşması ile enerji tasarrufu sağlanacağı için ülkenin ithalat kaleminin azalmasına da yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2012. www.cogen3.net.
- Anonim, 2013, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı [www.enerji.gov.tr/yayinler_raporlar/Enerji Grubu Raporu.pdf](http://www.enerji.gov.tr/yayinler_raporlar/Enerji_Grubu_Raporu.pdf)
- Anonymous, 2002. U.S. Environmental protection agency combined heat and power partnership. Technology Characterization of Reciprocating Engines.
- Anonymous, 2003. World Alliance For Decentralized Energy, Guide to Decentralized Energy Technologies.
- Abd-Alla, G.H., 2002. Computer simulation of a four stroke spark ignition engine. Energy Conversion and Management, 43, 1043-1061.
- Abuşoğlu, A., 2008. Dizel Motorlu Kojenerasyon Sistemlerinin Ekserjetik ve Termoekonomik Performans Analizi ve Optimizasyonu, Doktora Tezi Gaziantep Üniversitesi.
- Agnew, B., Talbi, M., Mostafavi, M., 1999. Combined power and cooling, an analysis of thcombined diesel-absorption cycle, Applied Thermal Engineering, 19, 1097-1105
- Aikins, J.E.A., 1995. An Investigation on the Factors That Determine the Atractivenes of Cogeneration bNeat Recovery System & CHp, 15 (5) 473-480
- Akdeniz, N., İlhan, C.D., Üçgül, İ., Acar, M., Bayhan, M., 2007. "Doğal Gazlı Kojenerasyon Sisteminin Termodinamik Analizi ve Süleyman Demirel Üniversitesi Örneği", VIII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 25-28 Ekim, İzmir, Türkiye.
- Alefeld, G., Radermacher, R., 1994. Heat Conversion Systems, 295s, CRC Press.
- Arıkan, N., Ağabay, Ö. ve Demirçivi, T., 2000. Deprem Bölgesindeki Yeni Konutlaşma İçin Küçük Ölçekli Kojenerasyon Uygulaması Örneği, İTÜ-TÜSİAD URBANM3 Projesi/Kocaeli, ICCI 2000 Konferans Kitabı, İstanbul.
- Aybers, N., Şahin, B., 1995. Enerji Maliyeti, YTÜ yayını.
- Badaniç, M., Csatti, A., Anzioso, F., 2005. Performance of an innovetive 120 kWe NaturalGas Cogeneration System, Energy, 48(2007), 823-833.
- Benson, R.S. and Whitehouse, N.D., 1979. Internal Combustion Engines, VI. Pergamon Press, London.
- Bidini, G., Grimaldi, C.N. Mariani, F., 1999. Experimantal Analysis of the Actual Beheaviour of a Natural Gas Fueled Engine Caterpillar (CAT) 3516. İtaly.
- Brian, A. And Breiner, M., 1999. Matlab 5 for Engineers. Addison Wesley Longman Limited.
- Casella, F., Maffezzoni, C., Piroddi, L. and Pretolani, F. 2001. Minimising Production Costs in Generation and Cogeneration Plants. Control Engineering Practice 9, 283-295.
- Casten, T.R., Brown, M., 2003. Guide to Decentralized Energy Technologies, World Report Allience for Decentralized Energy.

- Ceviz, M.A., 2004. Buji Ateşlemeli Motorlarda Yakıt- Hava Çevriminin Modellenerek Motor Performansının Teorik ve Deneysel Analizi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi.
- Ceviz, M.A., 2003. Yüksel, F., Yanma Ürünlerinin Bileşik ve Termokimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi, Termodinamik, 163.
- Çakır, U., 2007. Aziziye araştırma hastanesi enerji gereksinimi için kojenerasyon sisteminin uygulanabilirliği. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Çolak, İ., Bayındır, R., Sefa, İ., Demirbaş, Ş., Ergen, H., 2005. "Alternatif enerji kaynaklarının kullanımı", III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, 19-21 Ekim, Çiftlikköy, Mersin, Türkiye.
- Derbentli, T., 1996. Birleşik Isı Güç Sistemleri. Enerji derg. Sayfa: (6).
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, 2006. Enerji Sektöründe Sera Gazı Azaltımı Çalışma Grubu Raporu, http://www.enerji.gov.tr/yayinlar_raporlar/Enerji_Grubu_Raporu.pdf, 13.06.2013.
- Ferguson, C.R., 1986. Internal Combustion Engines. Applied Thermosciences, John Wiley and Sons.
- Ferguson, C.R., 2001. Internal Combustion Engines. Applied Thermosciences, Second edition. Florides, G.A., Kalogirou. S.A., 2002. Design and construction of a LiBr–water absorption machine, Energy Conversion and Management, 44 2483–2508
- Florides, G.A., Kalogirou, S.A., Tassou, S.A., Wrobel, L.C., 2002. Modelling, simulation and warming impact assessment of a domestic-size absorption solar cooling system, Applied Thermal Engineering, 22, 1313-1325.
- Fragiacomo, P., Arcuri, P., Florio, G. 2005. A mixed integer programming model for optimal design of trigeneration in a hospital complex Science Direct, Energy 32 (2007) 1430–1447
- Frangopoulos, C.A., Lygeros, A.I., Markou, C.T. and Kaloritis, P. 1996. Thermoeconomic Operation Optimization of the Hellenic Aspropyrgos Refinery Combined-Cycle Cogeneration System. Applied Thermal Engineering 16, 949-958.
- Ge, Y.T., Tassou, S.A., Chaer, I., Sugurtha, N., 2009. Performance evaluation of trigeneration system with simulation and experiment. Appl Energy; 86:2317–26.
- Gündüz, U., 1991. The exergy analysis of absorption cycles, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, 116s, Ankara.
- Hepbaşlı, A. ve Özalp, N., 2002. Co-generation Studies in Turkey: An Application of a Ceramic Factory in İzmir, Turkey. Applied Thermal Engineering 22, 679-691.
- Hernoe, T. 2004, Overview of Cogeneration Technologies and Applications, 2004 Cogeneration Week in Indonesia, 18 May 2004, Gran Melia Hotel, Jakarta.
- Herold EK, Radermacher R, Klein SA., 1996. Absorption chillers and heat pumps. CRS Press.
- İnallı, M., Yücel, H. ve Işık, E. 2002. Kojenerasyon Sistemlerinin Teknik ve Ekonomik Uygulanabilirliği, Mühendis ve Makina, Sayı: 506,
- Kayfeci, M., Engin G., Sarioğlu, S., Kurt, H., 2009. Tasıt İklimlendirmesinde Alternatif Klima Sistemlerinin Kullanımının Araştırılması, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük.

- Klimstra, J., 2003. Environmental Economic and Operational Benefits of Engine-Driven Cogeneration, ICCI Konferans Kitabı, İstanbul.
- Kıncay, O., Yumurtacı, Z., 2006. Bir Üniversite Kampüsü İçin Uygun Enerji Sisteminin Seçimi. Tesisat Mühendisliği sayı 95.
- Lee RJ, DiGuilio RM, Jeter SM, Teja AS., 1990. Properties of lithium bromide–water solutions at high temperatures and concentration. II. Density and viscosity. ASHRAE Trans;96(Pt. 1):709–28.
- Lee, S.F., Sherif, S.A., 2001. Thermodynamic analysis of a lithium bromide/water absorption system for cooling and heating applications, International Journal of Energy Research, 25, 1019-1031.
- Lewis, G.N. and Randall, M., 1961. Thermodynamics. Mc-Graw-Hill.
- Lucas, K., 2000. Lehrstuhl für Technische Thermodynamik. Germany.
- Luz-Silveira, J., Beyene, A., Leal, E.M., Santana, J.A., Okada, D., 2002. Thermo-economic analysis of a cogeneration system of a university campus, Applied Thermal Engineering 22 1471–1483.
- Mandıracioğlu A., 2010 Dünyada ve Türkiye’de yaşlıların demografik özellikleri, Ege Tıp Dergisi / Ege Journal of Medicine 49(3) Ek / Supplement: 39-45, 2010
- Meckler, M., 2002. BCHP design for dual phase medical complex, Applied Thermal Engineering 22 535–543.
- Mostafavi, M., Agnew, B., 1997. Thermodynamic analysis of combined diesel engine and absorption refrigeration unit-naturally aspirated diesel engine, Applied Thermal Engineering, 17(5), 471-478.
- Olikara, C. and Borman, G., 1975. A Computer program for calculating properties of equilibrium combustion products with some applications on IC engines. SAE Technical Paper No: 750468.
- Özaktaş, M.T., 1988 Benzin ve Doğalgaz motorunun çevrim analizinin matematiksel model ile karşılaştırılması. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Renedo, C.J., Ortiz, A., Manana, M., Silio, D., Perez, S., 2005. “Study Of Different Cogeneration Alternatives For A Spanish Hospital Center” Science Direct
- Riad, B., Michel, F., 1998. Energy Convers.Mgmt, No:16-18 Vol. 39 pp. 1791–1802. France.
- Rodriguez-Alvarez, A., Fernandez-Blanco, V., Knox Lovell, C.A., 2004. Allocative inefficiency and its costs: the case of Spanish public hospitals, International Journal of Production Economics 92 99–111.
- Rogers GFC, Mayhew YR., 1992. Thermodynamic and transport properties of fluids: SI units. 4th ed. UK: Blackwell Publishers.
- Sancar, O., 2010. Ticari binalarda uygulanan kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin teknoekonomik analizi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Schneider Electric, 2010. How energy efficiency ensures financial health for hospitals, White paper, October 2010.
- Silveria, J.L., Beyene, A., Leal, E.M., Santana, J.A. and Okada, D., 2002. Thermo-economic Analysis of a Cogeneration System of a University Campus, Applied Thermal Engineering, 22, 1471-1483.
- Smith, H., 1995. Hospital plant features two-engine cogeneration system for energy efficiency, ASHRAE Journal 37 43–44.

- Sözen, A., 2001. Effect of heat exchangers on performance of absorption refrigeration systems, *Energy Conversion and Management*, 42, 1699-1716.
- Stone R., 1993. *Introduction to Internal Combustion Engines*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Sun, D.W., 1997. Thermodynamic Design Data and Optimum Design Maps for Absorption Refrigeration Systems”, *Applied Thermal Engineering*, 17(3), 211-221.
- Szklo, A.S., Soares, J.B., Tolmasquim, M.T., 2004. Energy consumption indicators and CHP technical potential in the Brazilian hospital sector, *Energy Conversion and Management* 45 2075–2091.
- Şencan, A., 2004. Atık ısı ile çalışan absorpsiyonlu sistemlerin modellenmesi, ekserji analizi ve optimizasyonu. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Talbi M., Agnew, B., 2002. Energy recovery from diesel engine exhaust gases for performance enhancement and air conditioning, *Applied Thermal Engineering*, 22, 693-702.
- Tien, W., Yeh, R., 2007. Theoretical Analysis of Cogeneration System for Ships. *Energy Conversion and Management*, 48 (2007), 1965–1974.
- Woschni, G., 1967. An universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engines, *SAE Technical Paper No: 670931*.
- Varma HK, Mehrotra RK, Agrawal KN., 1994. Heat transfer during pool boiling of LiBr–water solutions at subatmospheric pressures. *Int Commun Heat Mass Transf*;21(4):539–48.
- Yenice, O.T., 2005. Kırsal kesimde kurulabilecek doğalgaz yakıtlı otoprodüktör kojenerasyon santralleri üzerine bir araştırma. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Ziher, D., Kitanovski, A., Cerkevnik, B., Poredos, A., 2000. Energetic review of the Clinical. Centre in Ljubljana
- Ziher, D., 2003. Combined production of electric, heating and cooling energy, *Master Science, Work*, Ljubljana.
- Ziher, D., Poredos, A., 2005. Economics of a trigeneration system in a hospital” *Applied Thermal Engineering* 26 680–687

ÖZGEÇMİŞ

Araştırmacı, 1977 yılında Erzurum İlinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 1995 yılında başladığı Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makineleri Bölümündeki lisans eğitimini 1998 yılına kadar sürdürdükten sonra 1998 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden 2002 yılında mezun oldu. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Termodinamik bilim dalında yüksek lisans eğitimine başlayıp 2007 yılında mezun olmuştur. 2008 yılında ise aynı bilim dalında doktora öğrenimine başlamıştır.

Evli ve bir çocuk babası olan Dünder Arif EKİNCİ, 2002-2004 yılları arasında Aktes Isı Sanayi bölge müdürlüğü, 2004-2006 yılları arası Bakü Tiflis Ceyhan Petrol Boru Hattı projesinde HVAC sistemler üzerine saha mühendisliği ve şantiye şefliği, 2006-2009 yılları arasında Baymak Makine Sanayi'nde bölge müdürlüğü görevlerini yürüttükten sonra, 2009 yılında Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Meslek Yüksek Okuluna öğretim görevlisi olarak atandı. 2011 yılından itibaren girdiği Sağlık Bakanlığı Sağlık Yatırımları Genel Müdürlüğünde ise halen bölge teknik koordinatörü olarak görev yapmaktadır.