

T.C.
KAFKAS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KAFKAS ÜNİVERSİTESİ SAĞLIK ARAŞTIRMA VE UYGULAMA
HASTANESİ ENERJİ İHTİYACININ KOJENERASYON VE
TRİJENERASYON SİSTEMİ İLE KARŞILANMASININ İNCELENMESİ

Oğuz OTHAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Arslan OMAR

OCAK-2021

KARS



T.C.
KAFKAS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**KAFKAS ÜNİVERSİTESİ SAĞLIK ARAŞTIRMA VE UYGULAMA
HASTANESİ ENERJİ İHTİYACININ KOJENERASYON VE
TRİJENERASYON SİSTEMİ İLE KARŞILANMASININ İNCELENMESİ**

**Oğuz OTHAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Arslan OMAR**

**OCAK-2021
KARS**

T.C. Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı öğrencisi Oğuz OTHAN' ın Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Arslan OMAR danışmanlığında Yüksek Lisans tezi olarak hazırladığı “Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi Enerji İhtiyacının Kojenerasyon ve Trijenarasyon Sistemi ile Karşılanmasının İncelenmesi” adlı bu çalışma, yapılan tez savunması sınavı sonunda jüri tarafından Lisansüstü Eğitim Öğretim Yönetmeliği uyarınca değerlendirilerek oy BİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

29 / 01 / 2021

Adı ve Soyadı

İmza

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Fatih MEDETALİBEYOĞLU

Üye : Doç. Dr. Ahmet Ali SERTKAYA

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Arslan OMAR

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ... / ... / 2021 gün ve ...
... / sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fikret AKDENİZ
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

Oğuz OTHAN

Tarih

ÖZET

(Yüksek Lisans Tezi)

Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi Enerji İhtiyacının
Kojenerasyon ve Trijenerasyon Sistemi ile Karşılanmasının İncelenmesi

Oğuz OTHAN

Kafkas Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Arslan OMAR

Tek bir kaynaktan eş zamanlı olarak elektrik ve ısı enerjisi çıktısı veren kojenerasyon (CHP) ve bu sistemlere tahrikini ısıdan alan bir soğutucu eklenmesiyle soğutma çıktısı da verebilen trijenerasyon (CCHP) uygulamaları enerji performansı açısından gelecek için umut verici bir profil sergilemektedirler. Bu teknolojilerin enerji tasarrufu, çevresel etkileri ve ekonomik performansları enerji çevrelerinin ilgisini çekmektedir. Yüksek elektrik ve ısı ihtiyacı olan hastaneler kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin uygulanması için en uygun yerlerdir. Bu çalışmada Kars'ta bulunan 276 yataklı bir üniversite hastanesine kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Elektrik ihtiyacının sürekliliği ve birim fiyatının yüksek olması nedeni ile hastanenin yıllık elektrik talebine göre motor seçimi yapılmıştır. Belirlenen elektrik çıktısına göre sistemin iki motorla yürütülmesinin hem motor verimi hem de sistem sürekliliği açısından daha yararlı olacağı düşünülerek tesisler iki motorlu olacak şekilde planlanmıştır. Her iki sistemin de çalışma planında elektrik ihtiyacının tamamını

karşılacak şekilde olması ve bu üretim sonucunda meydana gelen ısıtma ve soğutma çıktılarıyla hastanenin ihtiyacı olan ısının bir kısmının karşılanacağı düşünülmüştür. Sonuçta Kars iklim özelliklerine sahip olan bölgelerdeki hastanelere her iki sisteminde fayda sağlayacağı bulunmuştur. Kojenerasyon uygulamasının hayata geçirilecek olmasıyla yıllık 1.649.142 TL, trijenerasyon uygulamasıyla ise yıllık 1.661105 TL net kar edileceği bulunmuştur. Statik geri ödeme süresinin 2,41; dinamik geri ödeme süresinin 2,85 yıl olarak bulunduğu ve trijenerasyon sistemlerinin ilk yatırım maliyetlerinin daha yüksek olmasından dolayı hastaneye kojenerasyon tesislerinin daha da avantajlı olabileceği bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kojenerasyon, Trijenerasyon, Enerji verimliliği, Ekonomik analiz, Hastane.

2021, 147 sayfa

ABSTRACT

(M. Sc. Thesis)

Investigation of Energy Requirements of Kafkas University Health Research and
Application Hospital with Cogeneration and Trigeneration System

Kafkas University

Graduate School of Applied and Natural Sciences

Department of Thermodynamics

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Arslan OMAR

ABSTRACT

Cogeneration (CHP), which simultaneously outputs electrical and heat energy from a single source, and trigeneration (CCHP) applications, which can also provide cooling output by adding a heat-driven cooler to these systems, show a promising profile for the future in terms of energy performance. The energy saving, environmental impact and economic performance of these technologies attract the attention of energy authorities. Hospitals with high electricity and heat needs are the most suitable places for the application of cogeneration and trigeneration systems. In this study, the applicability of cogeneration and trigeneration systems to a university hospital with 276 beds in Kars was investigated. Due to the continuity of electricity need and the high unit price, the motor was selected according to the annual electricity demand of the hospital. Considering that running the system with two motors according to the determined electrical output would be more beneficial in terms of both motor efficiency and system

continuity, the facilities were planned with two motors. It was thought that both systems should meet the entire electricity need in the work plan and some of the heat needed by the hospital will be met with the heating and cooling outputs resulting from this production. As a result, it has been found that both systems will benefit hospitals in regions such as Kars with climatic characteristics. It has been found that, with the implementation of the cogeneration application, 1.649.142 TL will be saved annually and 1.661.105 TL will be saved annually with the trigeneration application. Static payback period and dynamic payback period were calculated as 2,41 and 2,85 years, respectively. It has been found that cogeneration facilities to the hospital can be more advantageous due to the higher initial investment costs of trigeneration systems.

Keywords: Cogeneration, Trigeneration, Energy efficiency, Economic analysis, Hospital.

2021, 147 page

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitim süreci boyunca her türlü bilgi, teşvik, deneyim ve yardımlarını esirgemeyen Danışmanım, Dr. Öğretim Üyesi Muhammed Arslan OMAR' a ve çalışmalarım esnasında her türlü maddi ve manevi destekleri ile göstermiş oldukları sabır ve ilgiden dolayı aileme teşekkür ederim.



İmza

Oğuz OTHAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	IV
ABSTRACT	VI
ÖNSÖZ	VIII
İÇİNDEKİLER	IX
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1	
Giriş.....	1
1.2 Birleşik Isı ve Güç Teknolojilerine Giriş.....	5
1.3 Birleşik Isı ve Güç Teknolojisinin Tarihi Gelişimi.....	7
1.4 Kojenerasyon Sistemleri.....	10
1.4.1 Kojenerasyon Sistemlerinin Tanımı ve Özellikleri.....	10
1.4.2 Kojenerasyon Sistemlerinin Elemanları.....	13
1.4.2.1 Güç Üreticileri.....	13
1.4.2.2 Isı Kazanım Ünitesi.....	14
1.4.2.3 Jeneratör ve Ekipmanları.....	16
1.4.2.4 Kontrol Sistemleri.....	17
1.4.3 Kojenerasyon Sistemlerinin Çalışma Prensibi.....	17
1.5 Kojenerasyon Sistemlerinin Sınıflandırılması.....	18
1.5.1 Ana Taşıyıcıya Göre.....	19
1.5.1.1 Buhar Türbinli Kojenerasyon.....	19
1.5.1.2 Gaz Türbinli Kojenerasyon.....	22
1.5.1.3 Mikro türbinli Kojenerasyon.....	26
1.5.1.4 Kombine Çevrimli Kojenerasyon.....	28
1.5.1.5 Pistonlu İçten Yanmalı Motorlu Kojenerasyon.....	29
1.5.1.6 Stirling Motorlu Kojenerasyon.....	36
1.5.1.7 Yakıt Hücreli Kojenerasyon.....	38
1.5.1.8 Organik Rankine Çevrimli Kojenerasyon.....	41
1.5.2 Enerji Sırasına Göre.....	45

1.5.2.1	Tepeleme Döngüsü.....	45
1.5.2.2	Dibe Vurma Döngüsü.....	46
1.5.3	Tesis Boyutuna Göre.....	47
1.5.3.1	Büyük Ölçekli Kojenerasyon.....	47
1.5.3.2	Küçük Ölçekli Kojenerasyon	47
1.5.3.3	Mikro Ölçekli Kojenerasyon.....	47
1.6	Birleşik Soğutma Isıtma ve Güç Teknolojilerine Giriş.....	48
1.7	Trijenerasyon Sistemleri.....	49
1.7.1	Trijenerasyon Sistemlerinin Tanımı ve Özellikleri.....	49
1.7.2	Trijenerasyon Sistemlerinde Soğutma.....	51
1.7.2.1	Kompresörlü Soğutma.....	51
1.7.2.2	Absorbsiyonlu Soğutma.....	52
1.7.3	Trijenerasyon Sistemlerinin Çalışma Prensibi.....	54
2.	LİTERATÜR TARAMASI	56
3.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	69
3.1	Çalışmanın Amacı.....	69
3.2	Örnek Hastanenin Tanıtımı.....	69
3.3	Örnek Hastanenin Enerji İhtiyacı.....	70
3.3.1	Hastanenin Elektrik İhtiyacı.....	72
3.3.2	Hastanenin Isı İhtiyacı.....	74
3.3.3	Hastanenin Soğutma İhtiyacı.....	77
3.4	Birleşik Isı ve Güç Teknolojisi Sisteminin Seçimi.....	78
3.4.1	Sistem seçimiyle İlgili Genel Bilgiler.....	78
3.4.2	Örnek Hastaneye Uygun Birleşik Isı ve Güç Sistemi Seçimi.....	81
3.4.2.1	Güç Kaynağı Seçimi.....	81
3.4.2.2	Güç Kaynağı Kapasitesi Belirleme.....	84
3.4.2.3	Yakıt Seçimi.....	86
3.5	Sistem tasarımları.....	88
3.5.1	Kojenerasyon Sisteminin Tasarımı.....	88
3.5.2	Trijenerasyon Sisteminin Tasarımı.....	90
3.6	Seçilen Motora Göre Sistemin Isıtma ve Soğutma Kapasitesinin Belirlenmesi..	91
3.6.1	Isıtma Kapasitesinin Belirlenmesi.....	91

3.6.2 Soğutma Kapasitesinin Belirlenmesi.....	97
3.7 Sistemin Ekonomik Analiz Kriterleri.....	105
3.8 Kojenerasyon ve Trijenerasyon Sistemlerinin Mali Değerleri.....	107
3.8.1 Kojenerasyon Sistemlerinin Giderleri.....	107
3.8.2 Trijenerasyon Sistemlerinin Giderleri.....	108
4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR.....	111
4.1 Sistemin Enerji Analizi.....	111
4.1.1 Sistemin Elektriksel Verimi.....	112
4.1.2 Sistemin Isıl Verimi.....	113
4.1.3 Sistemin Toplam Verimi.....	113
4.1.4 Sistemin Net Enerji Verimi.....	114
4.1.5 Sistemden Elde Edilen Enerji Tasarrufu.....	114
4.1.6 Sistemin Çevresel Analizi.....	116
4.2 Sistemlerin Çalıştırılma Planı.....	117
4.3 Sistemlerin Çalıştırılmasına İlişkin Bağlıntılar.....	118
4.4 Sistemlerin Çalıştırılması.....	119
4.4.1 Kojenerasyon Sisteminin Çalıştırılması.....	119
4.4.2 Trijenerasyon Sisteminin Çalıştırılması.....	121
4.5 Sistemlerin Ekonomik Analizi.....	125
4.5.1 Kojenerasyon Sisteminin Ekonomik Analizi.....	125
4.5.2 Trijenerasyon Sisteminin Ekonomik Analizi.....	128
5. SONUÇ.....	130
6. KAYNAKÇA.....	140

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 1.1	Enerji kaynaklarının sınıflandırılması	1
Şekil 1.2	Dünya enerji görünümü	2
Şekil 1.3	Dünya birincil enerji talebi	2
Şekil 1.4	Türkiye'deki elektrik üretiminde yerli ve ithal kaynakların dağılımı	4
Şekil 1.5	Türkiye' deki elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı	4
Şekil 1.6	Birleşik ısı ve güç teknolojilerinin klasik yöntemlerle enerji kaybı yönünden karşılaştırılması	6
Şekil 1.7	Kojenerasyon ve konvansiyonel sistemlerin verimlilik yönünden karşılaştırılması	7
Şekil 1.8	Elektrik ve ısı aynı anda üretildiği ilk santral	8
Şekil 1.9	Kojenerasyon ünitesinde enerji akışı	10
Şekil 1.10	Kojenerasyon ve konvansiyonel sistemlerinin Sankey diyagramıyla gösterimi	11
Şekil 1.11	Kojenerasyon sistemlerinin genel yapısı	12
Şekil 1.12	Kontrol panoları	17
Şekil 1.13	Kojenerasyon teknolojilerinin sınıflandırılması	18
Şekil 1.14	Buhar türbininin genel yapısı	19
Şekil 1.15	Rankine döngüsü	20
Şekil 1.16	Buhar türbinli kojenerasyon şeması	21
Şekil 1.17	Karşı basınçlı buhar türbini şeması	21
Şekil 1.18	Ara buhar almalı buhar türbini şeması	22
Şekil 1.19	Gaz türbininin genel yapısı	23
Şekil 1.20	Brayton döngüsü	23
Şekil 1.21	Gaz türbinli kojenerasyon sistemi şeması	25
Şekil 1.22	Mikro türbinin genel görünümü	26
Şekil 1.23	Mikro türbinli kojenerasyon santrali şeması	27
Şekil 1.24	Kombine çevrimli kojenerasyon şeması	29
Şekil 1.25	Pistonlu motor tahrikli kojenerasyon şeması	30

Şekil 1.26	Otto çevrimi	31
Şekil 1.27	İdeal otto çevriminin T-s diyagramı	32
Şekil 1.28	Gaz motorlu kojenerasyon santrali	33
Şekil 1.29	Gaz motorlu kojenerasyon sistemi akış şeması	34
Şekil 1.30	İçten yanmalı motorlarda yanma olayı	35
Şekil 1.31	Diesel çevrimi	35
Şekil 1.32	Dizel motorlu kojenerasyon şeması	36
Şekil 1.33	Stirling motorunun genel yapısı	37
Şekil 1.34	Stirling motor tahrikli kojenerasyon sistemi	38
Şekil 1.35	Yakıt pilinin genel yapısı	39
Şekil 1.36	Yakıt hücreli kojenerasyon sistemi	41
Şekil 1.37	Organik rankine çevriminin çalışma şeması	42
Şekil 1.38	Tepeleme döngüsünün akışı	45
Şekil 1.39	CHP' nin tepeleme döngüsünün şematik gösterimi	45
Şekil 1.40	Dibe vurma döngüsünün akışı	46
Şekil 1.41	CHP' nin dibe vurma döngüsünün şematik gösterimi	46
Şekil 1.42	Kojenerasyon ve trijenerasyon ayrımı	48
Şekil 1.43	Trijenerasyon ünitesinde enerji akışı	49
Şekil 1.44	İçten yanmalı motorlu trijenerasyon sistemi şeması	50
Şekil 1.45	Kompresörlü soğutma sistemi	51
Şekil 1.46	Tek aşamalı LiBr - H ₂ O absorpsiyonlu soğutma sistemi	54
Şekil 3.1	Kars Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi	69
Şekil 3.2	Hastanenin aylara göre elektrik tüketim değerleri	74
Şekil 3.3	Hastanenin aylara göre doğalgaz tüketim değerleri	77
Şekil 3.4	Hastanenin soğutma ihtiyacını karşılayan chiller grubu	78
Şekil 3.5	Aylara göre elektrik ve doğalgaz tüketim değerleri	83
Şekil 3.6	Aziziye Araştırma hastanesinin günlük elektrik tüketimi	85
Şekil 3.7	Erzurum Kampüs hastanesinin günlük elektrik tüketimi	85
Şekil 3.8	KSÜ hastanesinin günlük elektrik tüketimi	85
Şekil 3.9	MWM TCG 2016 V8C model gaz motoru	87
Şekil 3.10	Kojenerasyon sisteminin genel tasarımı	89

Şekil 3.11	Trijenerasyon sisteminin genel tasarımı	90
Şekil 3.12	Plakalı ısı değiştiricisi	92
Şekil 3.13	Motorlardan kazanılan ceket ısı şeması	93
Şekil 3.14	Atık ısı kazanı	95
Şekil 3.15	Borulu eşanjörde egzozdan kazanılan ısı şeması	95
Şekil 3.16	Isı geri kazanımı ve soğutma şeması	98
Şekil 3.17	LG WCMH model absorpsiyonlu soğutucu	103
Şekil 5.1	Kojenerasyon sistemiyle aylara göre üretilen enerji miktarları	133
Şekil 5.2	Kojenerasyon sistemiyle aylara göre karşılanamayan ve fazlalık ısı enerjisi miktarları	133
Şekil 5.3	Kojenerasyon sistemiyle aylara göre hastanenin elektrik ve ısı enerjisi ihtiyaçlarını karşılama yüzdeleri	134
Şekil 5.4	Trijenerasyon sistemiyle aylara göre üretilen enerji miktarları	135
Şekil 5.5	Trijenerasyon sistemiyle aylara göre karşılanamayan ve fazlalık soğutma enerjisi miktarları	136
Şekil 5.6	Trijenerasyon sistemiyle aylara göre hastanenin elektrik, ısı ve soğutma enerjisi ihtiyaçlarını karşılama yüzdeleri	136
Şekil 5.7	Sistemlerle elde edilen aylık net kazançlar	137
Şekil 5.8	Aylara göre net kazanç farkı	138

TABLolar DİZİNİ

		Sayfa
Tablo 1.1	Yakıt hücrelerinin genel özellikleri	40
Tablo 1.2	Bazı ana taşıyıcı tiplerine göre CHP tahmini ömür ve maliyet değerleri	43
Tablo 1.3	Kojenerasyon sistemleri ana taşıyıcıları için performans özeti	44
Tablo 3.1	Kars' ın 1931-2019 yılları arası meteorolojik verileri	71
Tablo 3.2	Hastanenin aylara göre elektrik tüketimleri ve maliyetleri	73
Tablo 3.3	Hastanenin aylara göre doğalgaz tüketimleri ve maliyetleri	76
Tablo 3.4	Birleşik ısı ve güç sistemi seçiminde etkili olan kriterler	80
Tablo 3.5	Aylara göre elektrik ve doğalgaz tüketim değerleri	82
Tablo 3.6	Ocak ayının saatlik tüketim değeri hesabı	84
Tablo 3.7	MWM TCG 2016 V8C model gaz motoruna ait özellikler	88
Tablo 3.8	Kojenerasyon sisteminin ilk yatırım kaynaklarının mali değerleri	108
Tablo 3.9	Kojenerasyon sisteminin ilk işletme giderlerinin mali değerleri	108
Tablo 3.10	Trijenerasyon sisteminin ilk yatırım kaynaklarının mali değerleri	109
Tablo 3.11	Trijenerasyon sisteminin ilk işletme giderlerinin mali değerleri	110
Tablo 4.1	Kojenerasyon sisteminin enerji değerleri	112
Tablo 4.2	Kojenerasyon sisteminin çalıştırılmasıyla elde edilen değerler	119
Tablo 4.3	Hastanenin kojenerasyon sisteminden sonra enerji ihtiyaçları ve karşılanamayan ısı enerjisi miktarları	120
Tablo 4.4	Kojenerasyon sisteminde şebekeden çekilen ısının maliyet değerleri	121
Tablo 4.5	Trijenerasyon sisteminin çalıştırılmasıyla elde edilen değerler	122
Tablo 4.6	Hastanenin kojenerasyon sisteminden sonra enerji ihtiyaçları ve karşılanamayan ısı enerjisi miktarları	123
Tablo 4.7	Trijenerasyon sisteminde şebekeden çekilen ısının maliyet değerleri	124
Tablo 4.8	Kojenerasyon sistemi öncesi ve sonrasına ait aylık giderler ve net kar değerleri	126
Tablo 4.9	Kojenerasyon sistemi öncesi ve sonrasına ait aylık giderler ve net kar değerleri	128

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SEMBOLLER DİZİNİ

Q	: Isı (kJ)
W	: İş (kJ)
ΔE	: Enerji değişimi (kJ)
\dot{Q}	: Isıl güç (kW)
\dot{m}	: Kütleli debi (kg/s)
c	: Özgül ısı (kJ / kg.K)
T	: Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$ veya K)
ΔT	: Sıcaklık değişimi ($^{\circ}\text{C}$ veya K)
\dot{Q}_{El}	: Elektriksel güç (kW)
\dot{Q}_{I}	: Isıtma gücü (kW)
\dot{Q}_{C}	: Ceket ısı (kW)
\dot{Q}_{E}	: Egzoz gazından kazanılan ısı güç (kW)
\dot{Q}_{S}	: Soğutma gücü (kW)
Q_{S}	: Soğutulan ortamdan çekilen ısı (kJ)
ρ	: Yoğunluk (kg / m ³)
η	: Verim (%)
H	: Yakıtla verilen enerji (kW)
H_{ref}	: Referans tesislerde üretimle harcanan yakıt enerjisi (kW)
W_{t}	: İç tüketim enerjisi (kW)
C_{K}	: Yıllık amortisman bedeli (TL/yıl)
t_{s}	: Statik geri ödeme süresi (yıl)
t_{g}	: Dinamik geri ödeme süresi (yıl)
G_{i}	: Yıllık net kazanç (TL)
G_{y}	: İlk yatırım maliyeti (TL)
I	: İlk yatırım değeri (TL)
f	: Yıllık faiz oranı (%)
n	: Kullanım ömrü (yıl)

γ_F : Referans yakıt için CO₂ emisyonu (kg.CO₂ / kW)



KISALTMALAR DİZİNİ

CHP	: Kombine Isı ve Güç (Kojenerasyon)
CCHP	: Kombine Soğutma Isı ve Güç (Trijenerasyon)
COP	: Performans katsayı değeri
EIO	: Elektrik ısı oranı
ELT	: Elektriksel yük izleme modu
ITS	: Entegre termal sistem
MPTLT	: Maksimum güç termal yük izleme modu
PES	: Birincil enerji tasarrufu
RCES	: Emisyon tasarruf oranı
SPH	: Basit geri ödeme süresi
TLT	: Termal yük izleme modu

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

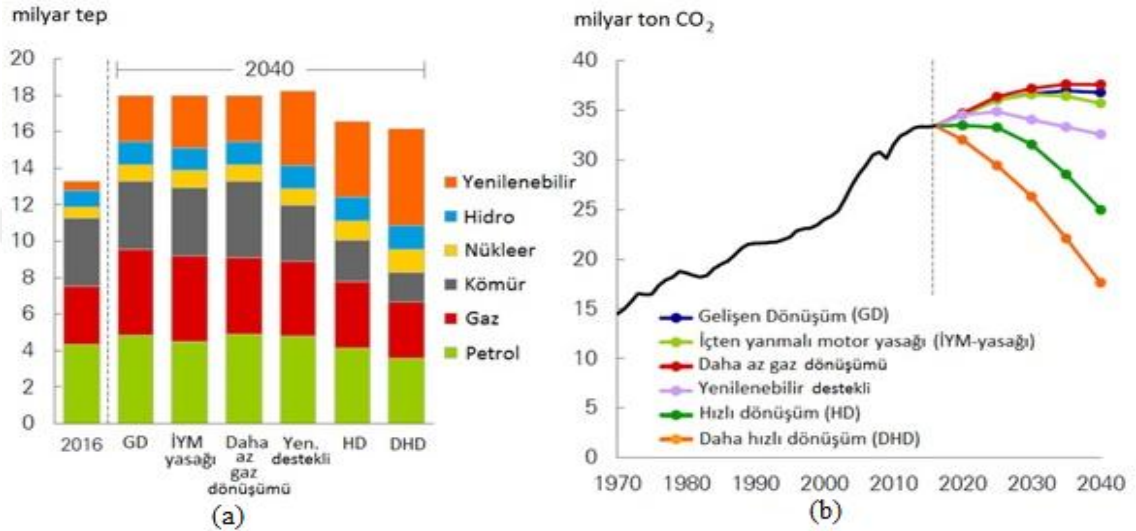
Enerji, dünya genelinde yaşamın vazgeçilmez bir kaynağı olarak karşımıza çıkan bir kavramdır. İnsanoğlunun en temel ihtiyaçlarından olup gerek yaşanılan çevrede gerekse küresel çapta önemli değişikliklere sebep olan faktörlerin başında gelmektedir [1]. Gerçekte soyut bir kavram ve direkt ölçülemeyen enerji, neden olabileceği iş ile değerlendirilebilir özelliktedir. Etkisi sonucunda meydana gelen kuvvet sayesinde belli bir cismin bu kuvvet doğrultusunda hareketine neden olması sonucunda kendini belli eder. Dolayısıyla tanım olarak ise kısaca iş yapabilme yeteneği yada kabiliyeti olarak adlandırılır [2]. Mekanik, nükleer, elektrik, ısı, kimyasal vb. farklı formlara sahip olabilen enerji bir türden diğer bir türe bir miktar kayıpla dönüşebilmekte ve kullanılabilir.

Enerji üretimi geçmiş dönemlerde daha çok fosil kaynaklı olarak kullanılırken günümüzde yenilenebilir ve dönüştürülebilir formlarda üretimi yapıp kullanılabilir. Şekil 1.1' de enerji kaynaklarının kullanışlarına göre ve dönüştürülebilirliklerine göre sınıflandırılması verilmiştir.

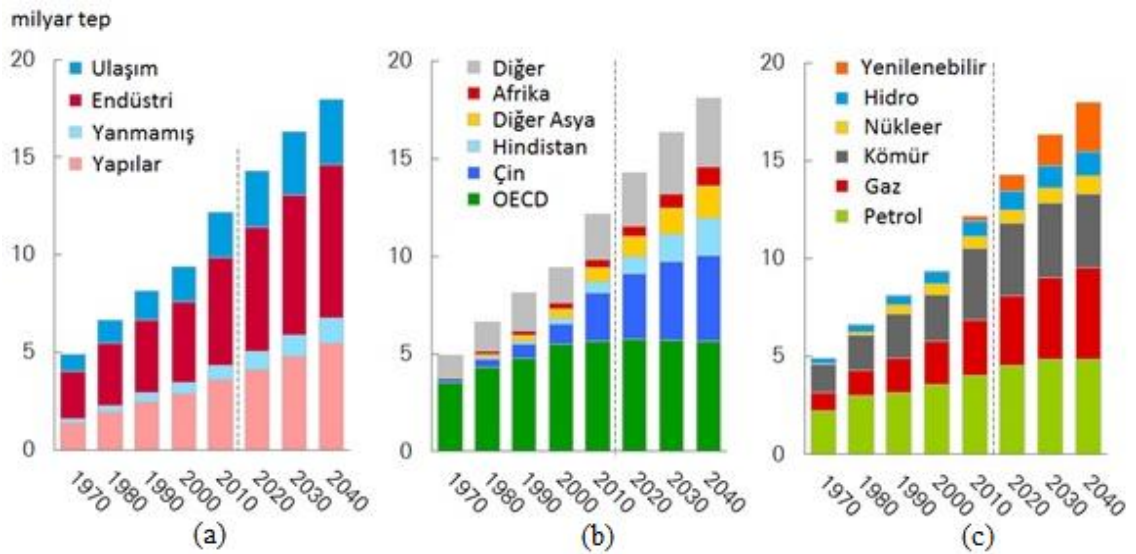


Şekil 1.1: Enerji kaynaklarının sınıflandırılması [3]

Yenilenebilir enerji kaynaklarının ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması, iklimsel ve çevresel koşullara göre değişkenlik gösterip her bölgeye uygun olmaması; uranyum ve toryum kaynaklarından enerji üreten nükleer santrallerin benzer şekilde yatırım masraflarının fazla olması ve gelecek için geri dönüşümsüz riskler barındırması sebebiyle günümüzde enerji üretiminde en fazla kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil kaynaklardan enerji üretilmektedir [4].



Şekil 1.2: Dünya enerji görünümü a) Yakıt bazlı birincil enerji tüketimi, b) Karbon emisyonları [5]



Şekil 1.3: Dünya birincil enerji talebi a) Son kullanıcı sektörü olarak, b) Bölge olarak, c) Yakıt bazlı [5]

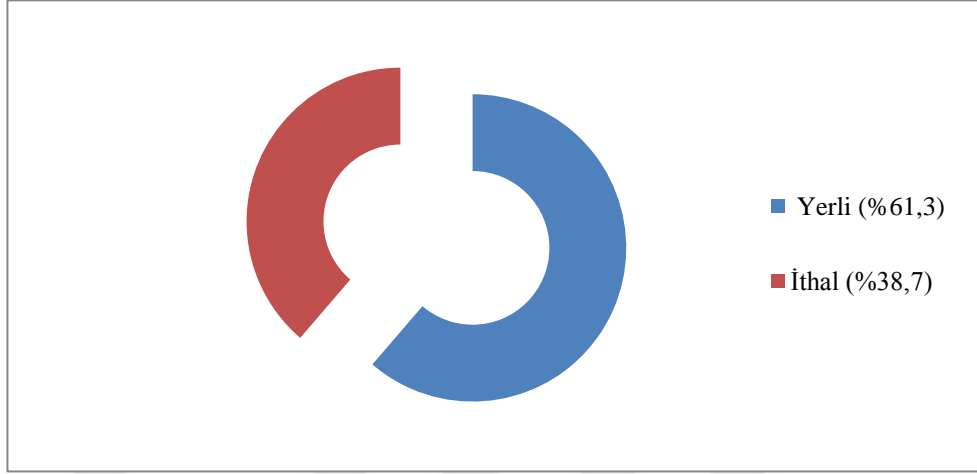
Fosil kaynaklı yakıtlardan enerji üretimi çevresel ve bunun sonucunda canlı yaşamını tehdit eden sorunları tetiklemektedir. Bu yakıtların emisyon değerlerinin fazla olması atmosferde sera gazları birikimine neden olarak dünyanın gitgide ısınmasına sebep olur. Bu ısınma küresel çapta meydana gelerek kuraklık, sel, iklim değişikliklerinin yaşanması, çevre kirliliğinin artması, ozon tabakasının incilmesiyle meydana gelen zararlı ultraviyole ışınların yeryüzüne ulaşması gibi olumsuzluklara zemin hazırlar [6]. Ayrıca fosil rezervlerinin azalması enerji sürekliliği açısından önemli bir sorundur. Kömür, petrol ve doğalgaz rezervlerinin sırasıyla 2227, 2040 ve 2065 yılında tamamen tükenebileceği yapılan çalışmalarla öngörülmektedir [7].

Enerjinin bu denli önemli olmasıyla beraber üretimindeki belirsizlikler ve sorunlara rağmen nüfus artışı, kentleşme, motorlu taşıt kullanımı, sanayileşme, teknolojik gelişmelerin hız kazanması vb. dünya genelinde enerjiye olan talebin günden güne artmasına neden olmaktadır. Sosyal ve sürdürülebilir anlamda gelişim sağlanması, ekonomik olarak iyileşme potansiyelinin var olmasında şüphesiz ki sektör olarak enerji önemli bir konumda bulunmaktadır [6]. Enerji tüketiminin gelişmişlik seviyesiyle paralel seyretmesi daha gelişmiş ülkelerde kişi başına elektrik tüketim oranının yüksek olmasını ifade etmektedir [1].

Hemen hemen bütün sektörlerde kullanılan enerji dolayısıyla ekonomiyi doğrudan etkilemektedir. Enerjiye olan gereksinimin önemli bir payını şüphesiz elektrik ve ısı formları oluşturmaktadır. Elektrik enerjisi genellikle ulusal şebekeden karşılanmakta, ısınma ihtiyacı ise büyük bir oranda fosil kaynaklı yakıtlardan karşılanmaktadır. Şebekeden alınan elektrik hem pahalı hem de konvansiyonel olarak üretildiğinden iletim sırasında meydana gelen kayıplardan ötürü düşük kalitededir [8, 9] . Bu gibi nedenlerden dolayı son yıllarda enerji üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmış ve ülkeler gelecek politikalarını enerji üzerine temellendirerek alternatif arayışlara yönelmişlerdir.

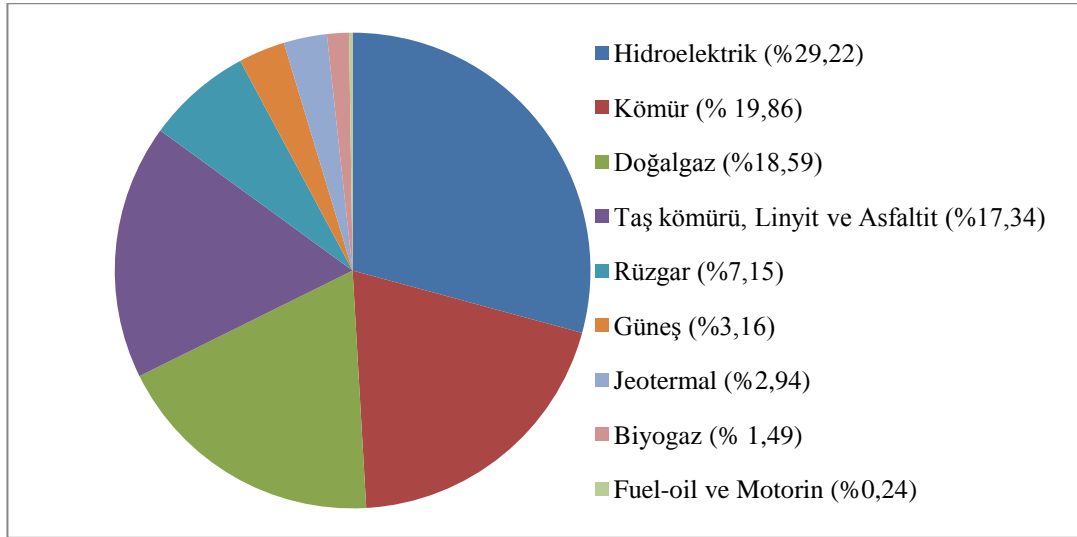
Türkiye, gelişmekte olan ülkeler kategorisinde yer almakta ve enerjiye olan ihtiyacı yıldan yıla artış göstermektedir [6]. Şekil 1.4' te görüldüğü gibi elektrik enerjisi üretimi için kaynakların önemli bir kısmını ithal eden ve yeterli kaynakların bulunmadığı

ülkemizde enerji tasarruf ve etkin kullanım politikalarının hayata geçirilmesi gerekmektedir.



Şekil 1.4: Türkiye' deki elektrik üretiminde yerli ve ithal kaynakların dağılımı [10]

Enerji olarak dışa bağımlılık, fosil rezervlerinin azalması, çevresel ve ekonomik sorunlar sebebiyle enerjinin üretimi ve kullanımı süreçlerinin gözden geçirilerek önemli bir enerji kaynağı olan elektriğin üretiminde fosil bazlı yakıtların büyük bir paya sahip olduğu Türkiye gibi ülkeler var olan alternatif seçenekleri değerlendirmeleri, gelecek açısından ülke lehine sonuçlanacaktır.



Şekil 1.5: Türkiye' deki elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı [10]

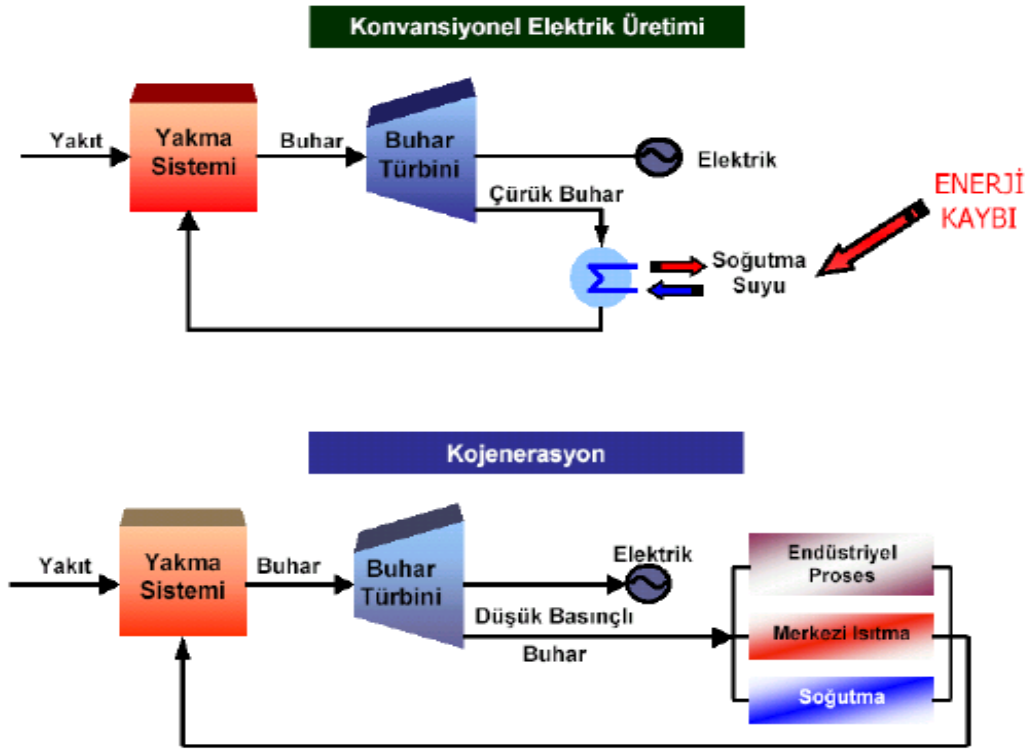
Temelde yenilenebilir enerji, yakıt hücreleri gibi alternatiflerin var olduğu politikalardan ziyade özellikle kullanılan yakıttaki kimyasal enerjiden büyük bir oranda yararlanarak enerji üretimini sağlayan "Birleşik Isı ve Güç" teknolojileri geleceğe ışık yakan alternatifler arasında ilk sıralardadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının ilk kurulum masrafı ve iklimsel duyarlılığı gibi olumsuzlukları enerjiyi verimli kullanmayı hedef edinen bu teknolojileri daha da ön plana çıkarmıştır. Birleşik ısı ve güç teknolojisi temelde tek bir kaynaktan aynı anda birden farklı enerji çeşidinin üretilmesidir. Bu teknoloji grupları kojenerasyon, trijenerasyon, polijenerasyon şeklinde farklı amaçlara hizmet edebilecek niteliğe sahiptir. Kojenerasyon aynı anda ısı ve elektrik üretimi, trijenerasyon ısı ve elektriğe ek olarak soğutma üretimi, polijenerasyon ise çoklu üretim olup ısı, elektrik ve soğutma gücüne ek olarak bazı kimyasalların üretimi (biyodizel, etanol, hidrojen vb.), içme suyu üretimi gibi olayların gerçekleştirilebildiği yöntemdir.

Bu tez çalışmasında kojenerasyon ve trijenerasyon ile ilgili tarihsel süreç ve genel bilgilere yer verilmiş olup özellikle elektrik ve ısı enerjisine ihtiyacın sürekli ve fazla olduğu, insan yaşamının vazgeçilmez yapıları olan Kars iklim şartlarında bir üniversite hastanesine, yıllık elektrik ve ısıl tüketimleri baz alınarak birleşik ısı ve güç teknolojilerinden olan kojenerasyon ve trijenerasyon tekniklerinin uygulanabilirliği ekonomik olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda hem trijenerasyon hem kojenerasyon uygulamalarının ekonomik, çevresel ve enerji tasarrufu açısından avantajlı olabileceği ancak Kars iklim özelliklerine benzer yerlerde hastanelere kojenerasyon sisteminin daha avantajlı olacağı bulunmuştur.

1.2. Birleşik Isı ve Güç Teknolojilerine Giriş

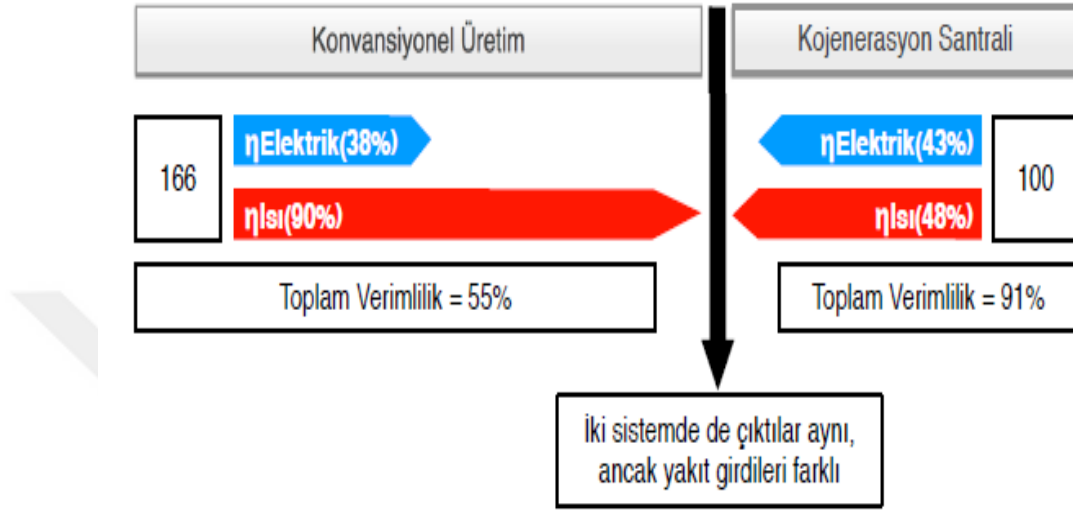
Günümüzde kullanılan en önemli enerji kaynaklarının arasında şüphesiz ki elektrik enerjisi yer almaktadır. Elektrik enerjisinin merkezi olarak üretiminin verimliliği, kaynak olarak doğalgaz kullanımındaki artış ve üretim tesislerinde kullanılan kombine çevrimler haricinde yaklaşık son 40 yılda kayda değer bir gelişme gösterememiştir [11]. Dünyada üretilen elektrik enerjisinin büyük bir payı kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtların, nükleer elementlerin ve biyokütle kaynaklı yakıtların ısı enerjini kullanarak elektrik üreten ısı motorlarından sağlanmaktadır. Elektrik üretiminin bu şekilde

yapıldığı yani elektriğin ayrıık olarak üretildiği konvansiyonel sistemlerde verim yaklaşık olarak % 20 ile % 60 arasında olmaktadır. Dolayısıyla başlangıçta kullanılan enerjinin % 40' ı ile % 80' i ısı enerjisi formunda işlevsiz olarak dışarıya atılmaktadır. Atık ısı miktarını azaltma amacıyla yapılan verimlilik araştırmalarıyla termodinamik olarak % 100 verimliliğe ulaşmanın mümkün olmayacağı ancak sistemin veriminin arttırılabileceği ortaya konmuştur. Buna rağmen halen daha enerjinin önemli bir miktarı boşa gitmektedir. Bu atık ısı, önemli bir enerji kaynağı (elektrik, fosil yakıt, petrol vb) kullanılarak üretilen bölgesel ısıtma, sıcak su, buhar üretimi, bazı endüstriyel faaliyetler gibi alanlarda kullanılabilir. Atık ısının kullanılmasıyla da sistem verimliliği önemli ölçüde artar. İşte bir kirlilik formu olarak da düşünölen bu atık ısıyı değerlendiren sistemlere "Birleşik Isı ve Güç" veya "Kombine Isı ve Güç" sistemleri adı verilir. Kullanılmayan atık ısının tekrardan kullanımı nedeniyle % 90' a ulaşabilen enerji verimliliği hem mali hem de çevresel olarak önemli avantajları beraberinde getirmektedir. Buna rağmen ileriki bölümlerde de değinilecek olan yararlarının geniş bir kitle tarafından kabul edilmesinin yanında birleşik ısı ve güç sistemlerinin dünya genelinde uygulamalarının yetersiz kaldığı görölmektedir [12].



Şekil 1.6: Birleşik ısı ve güç teknolojilerinin klasik (konvansiyonel) yöntemlerle enerji kaybı yönünden karşılaştırılması [13]

"Birleşik Isı ve Güç" kavramı, İngilizce "Combined generation" cümlesinden oluşan "Cogeneration" kelimesinin Türkçe ifadesi, "Birleşik Jenerasyon" anlamındaki "Kojenerasyon" veya yine İngilizce "Combined Heat and Power" kelimelerinin baş harflerinden oluşan "CHP" olarak farklı biçimde kullanılabilir.

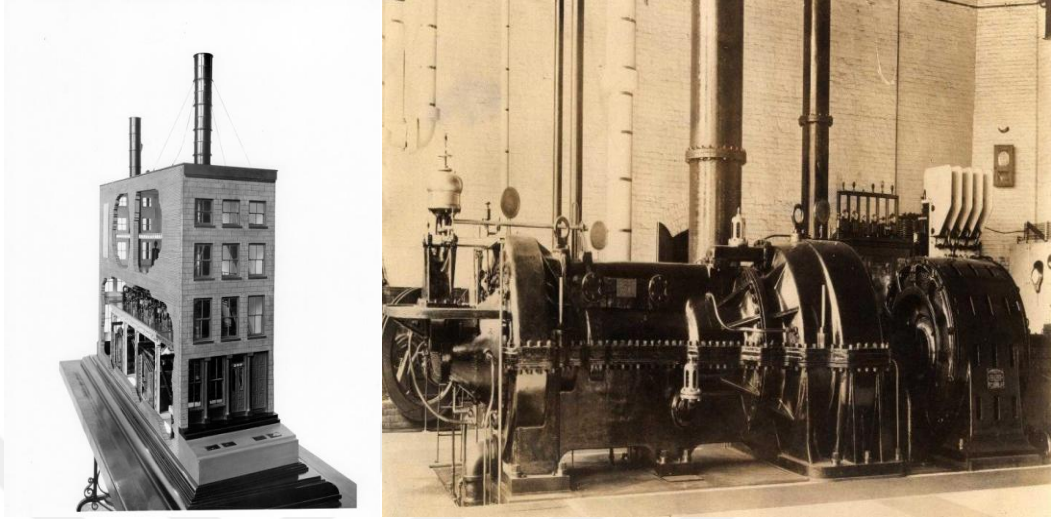


Şekil 1.7: Kojenerasyon ve konvansiyonel sistemlerin verimlilik yönünden karşılaştırılması [14]

1.3. Birleşik Isı ve Güç Teknolojisinin Tarihi Gelişimi

Elektrik üretimini ısı enerjisi üretimiyle kombine edilmesi olayının elektrik üretim teknolojisinin gelişiminin erken dönemlerinde fark edilmesi üzerine "Birleşik Isı ve Güç" sistemlerinin yeni olmadığı görülür [15]. Kojenerasyon uzun süredir bilinip uygulanmasına rağmen 1970' li yıllardaki petrol krizi ile gelişmesi büyümüştür [16]. Sanayi devrimi, üretimde mekanik düzenin gelişmesine neden olmuştur. Kömürün yanması sonucu buhar elde edilmiş ve bu buhardan yararlanılarak buhar motorlarında mekanik güç elde edilerek şaft, kasnak gibi iletim elemanları vasıtasıyla üretilen güç farklı farklı makinelerle aktarılmıştır [17]. Yüksek binalarda ısıtmanın sıcak su ile yapılması zor olacağı için merkezi ısıtma teknolojisi daha avantajlıdır ve bu teknolojiyi kullanan yerlerde (ABD, Avrupa ...) kojenerasyon uygulamaları daha sık kullanılmış ve daha çabuk gelişme olanağı bulmuştur [13]. 1877 senesinde bölgesel ısıtma uygulaması ilk olarak New York' ta kurulmuştur [18]. 19. yüzyılın sonlarında ve 20. yüzyılda

Avrupa ve Amerika' daki sanayi tesislerinin çoğunda kömürle çalışan kazanlar ve buhar türbini jeneratörleri sayesinde kendi elektriklerini ürettikleri görülür [11].



Şekil 1.8: Elektrik ve ısının aynı anda üretildiği ilk santral, New York [19]

20. yüzyılın ilk yıllarında güç merkezlerinin yaşam alanlarına kurulması ve yapıların sıcak su, proses, ısıtma gibi enerji talepleri karşılanmaya başlanmıştır [13]. Victoria mühendisleri üretilen elektrik enerjisinden kaynaklanan atık ısının sanayi üretim süreçlerinin kolaylaştırması ve kışın ısınma ihtiyacı için kullanılabileceğini fark etmişlerdir. Bundan sonra fabrika temelli birleşik ısı ve güçten gelen fazla enerjinin fabrikaya yakın kurumlara ve konutlara tahliye edilmesi uzun sürmemiştir [17]. Örnek olarak ABD' de şehir aydınlatması için kurulan santrallerden arta kalan ısı ev ve ofisler için sıcak su ve alan ısıtmada kullanılmıştır ve dünyanın diğer yerlerinde de kullanımı zamanla artmıştır. Birleşik Krallık ' ta azınlıkta bir kesim tarafından gelecek vaat eden bir sistem olarak görülmüştür [12].

Söz konusu zamanda elektrik verimliliğinin % 11 - % 12 civarlarında olduğu, yüzyıl sonrasında bile elektrik üretimi verimliliğinin ortalama % 33 olduğu halde kojenerasyon sistemleri hakkında öne çıkan kişilerden olan Tom Casten ABD' de elektrik üretiminin ortalama veriminin 1902' de % 66 olduğunu belirtmiştir [17]. Atık ısının kullanılmasıyla verimin artması aşıkardır. Birinci Dünya savaşı sonrasında yaşanan yakıt kıtlığı ve oluşan bunalım ortamı, 1920' li ve 1930' lu yıllarda artan elektrik üretimi sebebiyle kojenerasyon daha cazip hale gelmeye başlamıştır [15]. 1926 yılında Oscar Faber

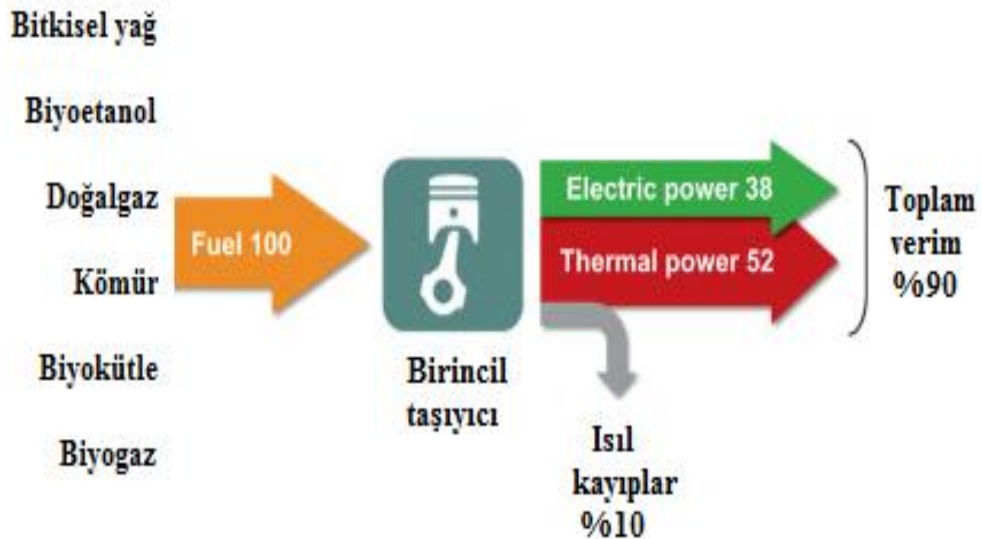
isyanların sık sık yaşandığı bir zamanda Birleşik Krallık' ın merkez bankasının dışa ve merkezi sisteme bağlılığını bitirmek için binanın derinliklerine elektrik santrali kurmuş ve elde edilen atık ısının tahliye edilmesi problemiyle karşı karşıya kalmış ve havalandırma sistemiyle değil de bir ısıtma sistemi kurarak binanın bu ısıyı kullanmasını sağlamıştır. Bu sistem kojenerasyon sisteminin ticari binada ilk kullanım örneği olarak belgelenmiştir [17]. 1930' lu yıllardan sonra bölge ısıtma uygulamalarında Almanya, kaynar su ve kojenerasyon teknolojisine geçmiştir. Yakıt fiyatlarının azalmasıyla 1940' larda birleşik ısı ve güç uygulamaları popüleritesini yitirmeye başlamıştır. Bölge ısıtması sistemleri, İngiltere' de kojenerasyon teknolojilerinin gelişmesiyle beraber 1945' ten itibaren seri şekilde fazlalaşmıştır [18]. 1950' li yıllarda İskandinavya bölgesinde, ABD' nin bazı kentlerinde, Almanya ve Rusya gibi ülkelerde bölgesel ısıtma sistemleri kurularak üretim tesislerinin de kojenerasyon sisteminden yararlanabileceği düşüncesi gittikçe yaygınlaşmıştır. Hem elektrik hem de ısı enerjisinin yoğun olarak kullanıldığı kağıt fabrikaları ve kimyasal fabrikalar bu düşüncenin örneklerini oluşturur [15]. Yakıt fiyatlarının düşmesi, elektriğin ayrık bir şekilde üretiminin maliyetindeki olumlu değişimler ve regülasyonsal tutumlar nedeniyle kojenerasyon tesislerine olan ilgi kağıt ve petrol endüstrileri hariç diğer sanayi tesislerinde azalmıştır. 1970' lere gelindiğinde 1973 - 1979 petrol krizleri ve beraberinde getirdiği yakıt ihtiyacının karşılanmasındaki belirsizlik, zorluk ve fiyatlarda meydana gelen artış özellikle de yüksek ısı ihtiyacı olan sanayi kuruluşlarında kojenerasyona olan ilgiyi tekrardan arttırmıştır [11]. Bunu takiben 1970' li ve 1980' li yıllarda doğal gaz kullanımının da artmasıyla enerji tasarrufu açısından kojenerasyona yeşil ışık yakmıştır. Teknolojinin de gelişmesiyle programlanabilir özelliğe sahip olan entegre kontrol sistemleri ile daha modern bir sisteme geçilerek maliyet düşürülmüş olup endüstriyel gaz türbinlerinden başka pistonlu gaz motorlu tahrik sistemlerde daha kullanılabilir duruma gelmiştir. Ardından mikroişlemcilerinde ortaya çıkmasıyla mikro CHP sistemlerine rastlanarak gerek uygulama alanları gerekse boyut olarak geniş bir yelpazede boy gösteren kojenerasyon sistemleri daha da modern bir konuma ilerlemiştir [17]. Böylelikle 1980 ve 1990' lı yıllarda yeni yasal düzenlemelerin getirdiği kolaylıklarla ve kojenerasyonla ilgili farklı yeniliklerin ortaya çıkmasıyla ofislere, konutlara, küçük boyuttaki fabrikalara kojenerasyon tesisleri kurulmaya başlanmıştır [12, 17]. 1990' lı yılların sonuna doğru kojenerasyon gerçek anlamda mikro boyut

seviyesine entegre edilerek daha küçük çaptaki konutlara uygulanmaya başlanmıştır [17]. 2000' li yıllarda ise üniversitelerde, hastanelerde, ticari binalarda, gıda ve ilaç sanayisinde vb. kullanılmaya başlanmıştır. 21. yüzyılda kojenerasyon sistemlerinin daha da ileriye gitmesi hızlanarak trijenerasyon ve polijenerasyon gibi kullanım alanına göre değişmekle beraber daha yüksek enerji verimliliğine göz kırpan uygulamalarda gelişme sağlanmıştır. Bu sistemlerin enerji verimliliği, maliyet ve çevresel etkiler konularında iddialı oldukları son yıllarda yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır.

1.4. Kojenerasyon Sistemleri

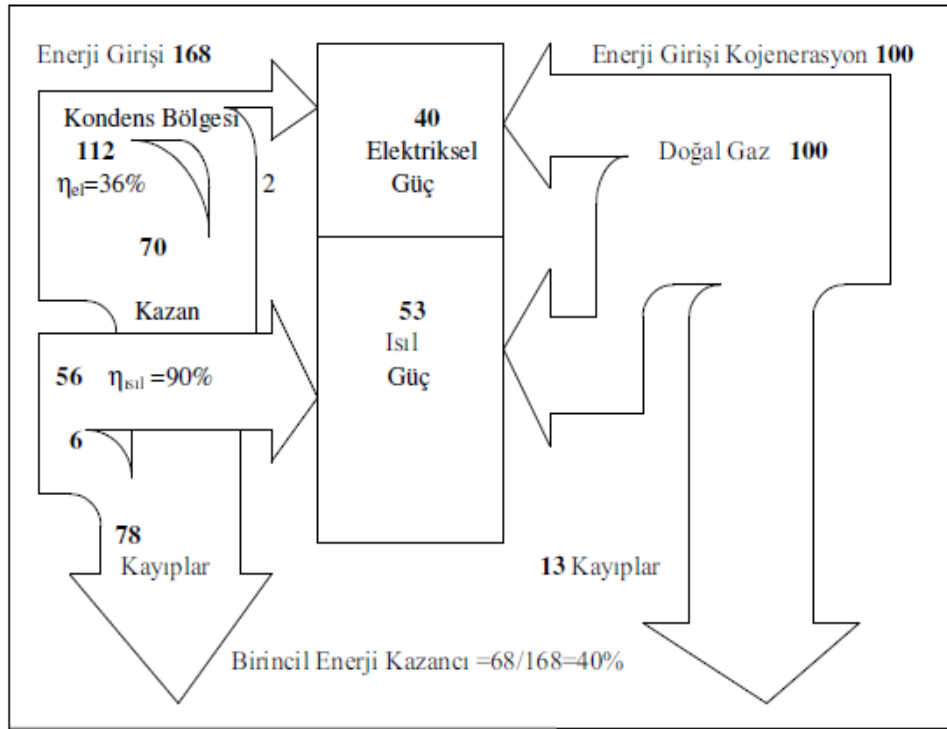
1.4.1. Kojenerasyon Sistemlerinin Tanımı ve Özellikleri

Birleşik Isı ve Güç (CHP) veya başka bir deyişle Kojenerasyon, tek bir enerji kaynağından termal ve elektriksel \ veya mekanik enerjinin aynı sistem içerisinde aynı anda üretilip kullanılabilmesidir. Kömür, petrol, doğal gaz gibi fosil kaynaklı yakıtlar, yenilenebilir bazlı kaynaklar ve nükleer yakıtlar kojenerasyon sisteminde enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Yüzyıldan daha fazla bir geçmişe sahip olan bu sistemler enerji verimliliği, maliyet ve çevresel konularında oldukça güvenilir sonuçlar vermektedir.



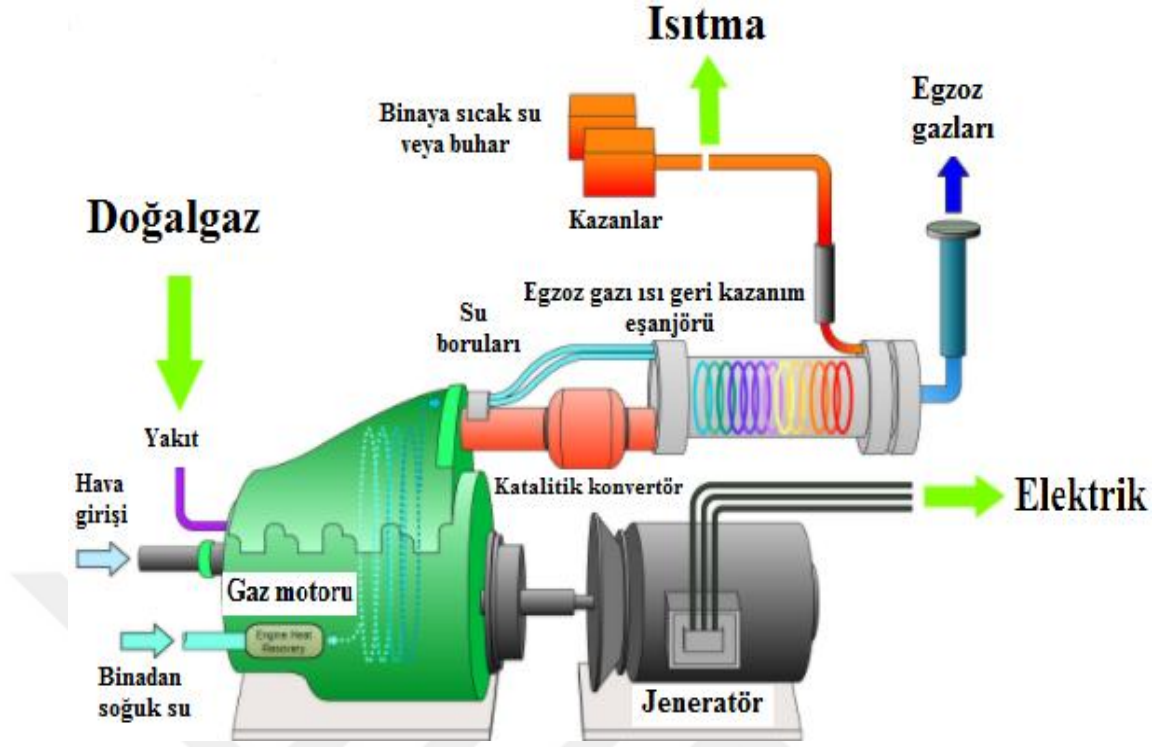
Şekil 1.9: Kojenerasyon ünitesinde enerji akışı [20]

Elektrik üretimi esnasında çıkan atık ısı bir miktar enerji harcanarak geri kazanılarak alan ısıtma, su ısıtma, çeşitli endüstriyel işlemlerde kullanılabilir ısı şeklinde kullanılarak enerji verimliliğinde önemli getiriler elde edilir [21]. Elektrik ve ısının birlikte üretilebildiği kojenerasyon sistemi bu iki enerji çeşidinin birbirinden bağımsız bir şekilde üretilmesinden daha verimli ve ekonomik sonuçlar sağlar. Konvansiyonel de denilen sadece elektriğin üretimine odaklanıldığı basit çevrimde yaklaşık olarak % 30 - % 40 civarlarındaki verimliliğine karşın dışarıya atılacak olan ısının büyük bir çoğunluğunun değerlendirilerek kullanılabilir hale getirilmesiyle ana yakıttaki enerjinin büyük bir kısmı kullanılarak yaklaşık % 70 - % 90 gibi verimlik değerleri kojenerasyon sistemleriyle mümkün hale gelebilmektedir [22].



Şekil 1.10: Kojenerasyon ve konvansiyonel sistemlerinin Sankey diyagramıyla gösterimi [13].

Termodinamiksel kanunların onayladığı limitlerden dolayı enerji santrallerinde yakıtın kimyasal enerjisinin elektriğe dönüştürülmesi sırasında atık olarak yüksek miktarda ısı enerjisi çıkmaktadır. Isı enerjisinin zor taşınması ve taşınması esnasındaki kayıpların fazla olabileceği düşünülerek kojenerasyon tesisinin söz konusu birime yakın kurulması birçok avantajı beraberinde getirecektir [20].



Şekil 1.11: Kojenerasyon sistemlerinin genel yapısı [23]

Hem bu açıdan hem de genel anlamda bakıldığında Kojenerasyon sistemlerinin yararlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz :

- ✓ Isıl enerjinin geri kazanılması nedeniyle konvansiyonel sistemlere göre daha yüksek enerji dönüşüm verimliliği
- ✓ Sera gazı ve diğer kirleticilerin emisyonunun azalmasıyla hava kirliliğinin azalması
- ✓ Merkezi santrallere göre daha modüler ve kurulum sürelerinin kısa olması
- ✓ Elektrik üretiminin birimin yakınında sağlanmasıyla elektriksel iletimden kaynaklı kayıpların azalması
- ✓ Gerek son tüketici gerekse devlet için birçok yönden ekonomik tasarruf sağlaması
- ✓ Büyük, orta ve küçük yapı veya işletmeler de kullanılabilirliği
- ✓ İhtiyaç halinde yedek güç ve kesintisiz enerji sağlayabilme nedeniyle gelişmiş güvenilirliğe sahip olması
- ✓ Artan yakıt esnekliğiyle yakıt tedarikinin kolaylaşması ve yakıt maliyetinin azalması

- ✓ Fazla elektriği satabilme imkanı nedeniyle sektöre gelir kaynağı sunması
- ✓ Birimin ısı ve elektriksel talepleri doğrultusunda sistemin ölçeklendirilebilmesi
- ✓ Yakıt ve alt yapısal maliyetlerde önemli ölçüde azalma
- ✓ Enerji kullanımını azaltma, atık kontrolü, sürdürülebilir planlama gibi sektöre özel faydalarla rekabeti tetiklemesi
- ✓ Geniş coğrafi alanlara uygulanabilir olması [20, 21, 24-26].

Yukarıda sıralanan avantajların yanı sıra kojenerasyon sisteminin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunları şu şekilde sıralayabiliriz :

- ✓ Tesis büyüklüğünden kaynaklı merkezi enerji üretim santrallerinden daha düşük elektriksel verime sahip olabilmesi
- ✓ Elektrik ve ısı üretimi için ilk etapta yüksek yatırım maliyeti
- ✓ Hem yönetimsel hem de kullanıcı için sistemin karmaşık olması
- ✓ Yapım ve kullanım aşamasında izin mevzuatlarının olması [20].

1.4.2. Kojenerasyon Sistemlerinin Elemanları

Kojenerasyon sistemleri genel olarak 4 bölümden oluşmaktadır [27].

1. Yakıttaki enerjinin mekanik ve ısı enerjisine dönüştüğü ana taşıyıcı yada birincil taşıyıcıda denilen Güç üreticileri
2. Oluşan ıyı geri kazanmak için ısı kazanım ünitesi
3. Mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştüğü jeneratör ve ekipmanlar
4. Sistemin çalışmasını denetleyen kontrol mekanizması

1.4.2.1. Güç Üreticileri

Kojenerasyon tesislerinin mekaniksel hareket gücünün sağlandığı ve ısı enerjisinin üretildiği elamanıdır. Kojenerasyon uygulamalarında birincil taşıyıcı yada ana taşıyıcı olarak görev yapan ve sistemin, temel yükünü omuzlayan ,seçiminde, veriminde önemli derecede etkili olabilen güç kaynakları aşağıda sıralanmıştır.

- ✓ Buhar türbini
- ✓ Gaz türbini
- ✓ Mikro türbin
- ✓ Kombine çevrim
- ✓ Pistonlu içten yanmalı motorlar
- ✓ Gelişmekte olan teknolojiler
 - Stirling motorları
 - Yakıt hücreleri
 - Organik Rankine döngüsü

Kojenerasyon sistemlerinde güç üreticilerinin hangisinin olacağına karar verilmesi önemli olmakla beraber bu seçim kullanılacak enerji (elektrik, termal, soğutma) ihtiyacına göre belirlenir. Elektrik ısıtma ve / veya soğutma talebinin yanında yakıt çeşidi, temini ve ekonomisi, tesisin kurulacağı yerin gürültü ve emisyon miktarlarına göre analizi vb. etmenler dikkate alınarak güç üretici seçimi yapılır [22].

1.4.2.2. Isı Kazanım Ünitesi

Kojenerasyon sistemlerinin diğer konvansiyonel sistemlere göre verimlerinin yüksek olmasının sebebi reddedilen atık ısıyı yakalayıp değerlendirebilmelerinden ileri gelmektedir. Elektrik üretimi sırasında açığa çıkan ısı enerjisi genellikle ısı eşanjörlerinden oluşan ısı kazanım ünitelerinde yada başka bir deyişle atık ısı kazanlarında tekrardan kullanılabilir forma getirilerek sistemin genel veriminin artmasına sebep olur.

Atık ısı kazanları temelde aşağıdaki elemanlardan oluşmaktadır [28]:

- Isı eşanjörleri ve elemanları
- Kazan için besleme suyu ekipmanları
- Genleşme tankları
- Kompansatör
- Boru düzenekleri

Isı eşanjörleri, ısı transferinin olduğu bölgede akışkanlarla temas halinde olup alan ve akış tasarımları, ısı eşanjörü etkinliği, sıcaklık, basınç, bağıl nem, basınç, fan gücü vb. etmenler ısı geri kazanım ünitelerinin performansını doğrudan etkilemektedir. Ateşsiz ve ateşlenen olmak üzere 2 çeşit ısı kazanım türü bulunmaktadır. Ateşsiz tip üniteler termal enerji üretmek için yakıt yakmayarak farklı tipte ısı eşanjörleri (mikro kanallı, kabuk, boru vb.), ateşlenmemiş buhar jeneratörleri, susturucular, rejeneratör, reküperatör gibi elemanlarla ısı kazanırlar. Ateşlenen tip üniteler ise kaynaktan gelen ısıyı çeker ve yakıt yakarak gerekli termal enerji üretimi sağlamış olur. Çevresel kirlilik açısından yakıtın yakılmadığı ateşsiz tip üniteler daha avantajlı olabilir [29].

Ana taşıyıcıda mekanik güce dönüşmeyen enerjinin tamamına yakını egzoz gazına geçerek kurutma vb. uygulamalarda doğrudan kullanılabilmesi gibi atık ısı kazanında buhar ve kızgın sıcak su üretimi yapılabilir [30]. Kojenerasyon tesislerinin önemli birimlerinden olan ısı kazanım üniteleri sistemin itici gücünü oluşturan ısı motorlarının egzoz çıkışlarına yerleştirilir. Kondenser ve besleme suyu desteğiyle kazana giren suyun egzoz gazları yardımıyla kızdırma sıcaklığına getirilmesiyle buhar elde edilir. Bu buhar talebe göre sıcak su veya buhar olarak sisteme verilip değerlendirilir [22]. Bir başka kullanım alanı ise egzoz gazının direkt hava ile karıştırılıp kurutma alanında kullanımınıdır [13].

Toplam verimi arttırarak enerji üretim sistemlerinde maliyeti azalttığı için uygulama alanı son yıllarda fazlalaşan atık ısı kazanı üniteleri teknolojik gelişmelere paralel bir şekilde daha da verimli olacak şekilde tasarlanmaya başlanmıştır. Yaklaşık 450 - 530 °C sıcaklık değerine sahip egzoz gazlarının 100 - 150 °C' ye kadar azaltılmasının gerçekleştiği gaz türbinli bu üniteler çevresel olarak da avantajlı olabilmektedir. Tek, 2 ve 3 basınçlı olarak tasarlanabilen atık ısı kazanlarında gaz hareketi yatay veya dikey seçenekleriyle karşımıza çıkar. Her bir basınç seçeneği için buhar dramı ayrı bulunur. Dikey olarak tasarlanan atık ısı kazanlarında dolaşım pompası sayesinde zorlamalı bir şekilde buhar dramı ile buharlaştırıcı boruları arası sirkülasyon sağlanarak bu sayede yüksek ısı transferi katsayısı ve bunun sonucunda da ısıtma yüzeyinin düşmesi üzerine diğer seçeneğe göre az malzeme kullanımı ve sıcaklık değişimlerine daha iyi adapte olabilme gibi avantajları vardır. Ancak ek maliyet, bakım giderleri ve suyun yüksek basınç ve sıcaklığa sahip olmasıyla sızdırmazlık sorunları gibi dezavantajları da

mevcuttur. Atık gazların genellikle kirlilik düzeylerinin az olması sebebiyle ısı transfer oranını yükseltmek için ekonomizer, buharlaştırıcı ve kızdırıcılarda kanatlı borular kullanılır. Gaz ile boru arasındaki toplam ısı transfer katsayısı ve sıcaklık farkının fazla olması sebebiyle direkt yanmalı kazanlara ekonomizerler haricinde çıplak borular kullanılır. Kızdırıcılarda kanatlı boruların kullanılmasıyla birim yüzeye daha fazla ısı geçişi mekanizmasıyla boyutlar küçülür ve kanatlı boruların çıplak borulardan daha ekonomik olması nedeniyle maliyet azalır [22].

Atık ısı kazanlarında geri kazanılan genel olarak aşağıdaki amaçlar için kullanılır [13].

- ✓ Sıcak su, sıcak hava, sıcak gaz ve buhar ile ortam alan ısıtması ve kurutma prosesleri uygulamaları
- ✓ Kızgın su ile kazan besleme suyu ön ısıtması
- ✓ Sıcak su ile yağ alma ve temizleme işlemleri
- ✓ Proses buharı ile çamaşırhane ve boru testi vs. işlemleri
- ✓ Kızgın buhar üretimiyle kombine çevrimli santral uygulamaları
- ✓ Kızgın yağ üretimiyle plastik eritme
- ✓ Atık ısı ile absorpsiyonlu soğutma sistemlerinde iklimlendirme işlemleri

1.4.2.3. Jeneratör ve Ekipmanları

Jeneratör veya elektrik üretici, buhar türbinleri, içten yanmalı motorlar, gaz türbinleri vb. sistemlerden elde edilen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren makinelerdir. Kojenerasyon uygulamalarında birincil taşıyıcının tahrikiyle elektrik üreterek sistemin güç çıktısını oluştururlar.

Jeneratörlerden başka trafolar, iletim elemanları, nötr direnci, jeneratör şalter ve kumanda panosu, sayaçlar, şalt sistemi (devre kesicisi, ayırıcı, akım trafosu, gerilim trafosu, topraklama ayırıcısı, koruma rölesi, hücreler arası kilitleme sistemi) , kontrol sistemleri kojenerasyon sistemlerinin diğer elektriksel ekipmanlarını oluşturur. Bu elemanlara ek olarak fazla güç üretiminde şebekeye elektriği aktaran yada sistemin ihtiyaca cevap vermemesi durumunda şebekeden elektrik alınmasını sağlayan ve kontrol eden elemanlar da bulunabilir [28].

1.4.2.4. Kontrol Sistemleri

Kontrol sistemleri, kojenerasyon uygulamalarının amaca uygun hizmeti için sistemin işlemlerini, sistemin çalışma esnasında takip edilmesini, sistemin korunmasını vb. gibi sistemi denetleme, kontrol etme mekanizmalarıdır. Sistemin işleyişiyle ve elemanlarıyla ilgili bilgiler (arıza sinyalleri, güç değerleri vb) görüntülenerek acil durumlara uygun senaryolar kontrol sistemlerince uygulanır. Fazla gücün şebekeye aktarımını yada güç eksikliği durumunda tesisin optimal çalışması için şebekeden güç alımını devreye sokar. Ayrıca egzoz gazı sıcaklığı, motor yük ayarı, havalandırma, soğutucular vb. kontrollerini de yapar [28].



Şekil 1.12: Kontrol panoları [31]

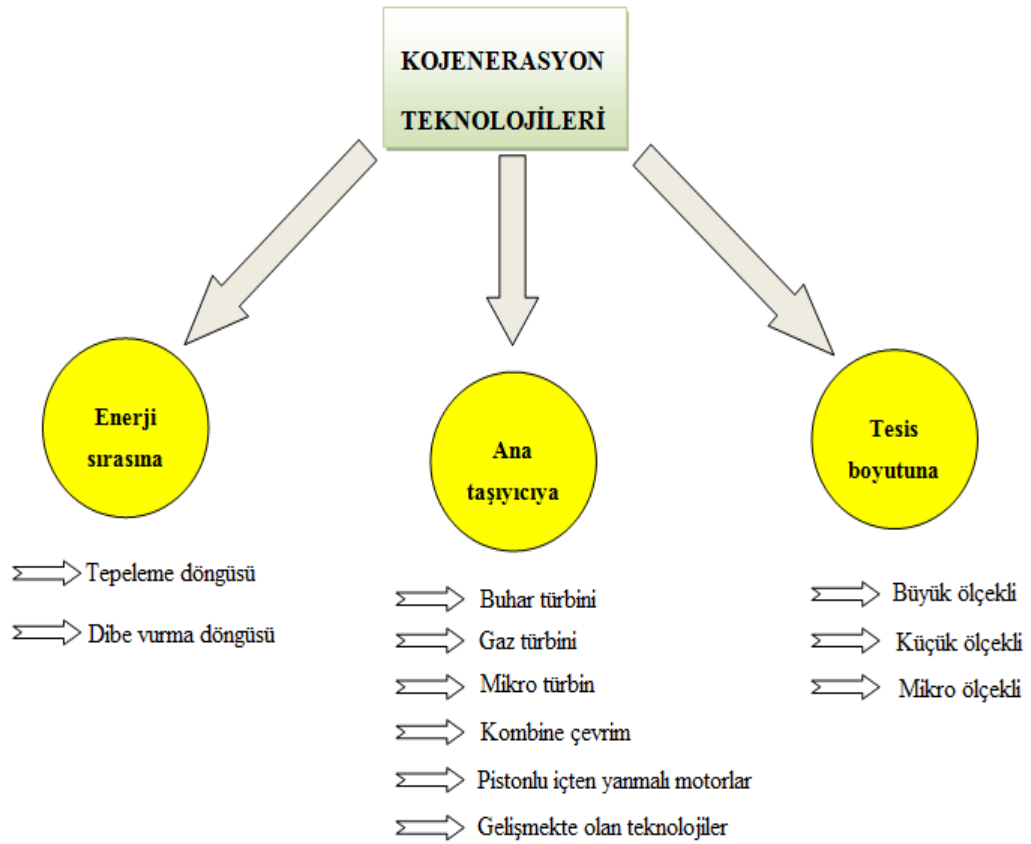
1.4.3. Kojenerasyon Sistemlerinin Çalışma Prensibi

Kojenerasyon sistemleri, geleneksel sistemlerde enerjisinin değerlendirilmediği atık olarak nitelendirilen ısının enerjisinin bir kısmını değerlendirerek kullanılabilir hale getirip geleneksel sistem çalışma ilkesinden bir adım daha ileri giderek elektrik üretimi yanında termal enerjide üretir. Kojenerasyon santrallerinin çalışma prensibi aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- ✓ Kojenerasyon sistemi ana taşıyıcısının yanma ünitesine atmosferden hava girişi olur.
- ✓ Sisteme uygun olan yakıt, yanma ünitesine gönderilir.
- ✓ Yanma ünitesindeki yakıt, hava sayesinde yanar.
- ✓ Yanma sonucu açığa enerji mekanik formda ana taşıyıcıya bağlı jeneratöre aktarılır.
- ✓ Jeneratör aldığı mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür.
- ✓ Yanma sonucu meydana gelen atık ısı, enerjisinden yararlanılmak için ısı kazanım birimine gider.
- ✓ Isı kazanım biriminde kullanım amacına bağlı olarak değerlendirilir.

1.5. Kojenerasyon Sistemlerinin Sınıflandırılması

Kojenerasyon teknolojileri çeşitli faktörlere göre sınıflandırılabilir [25].



Şekil 1.13: Kojenerasyon teknolojilerinin sınıflandırılması

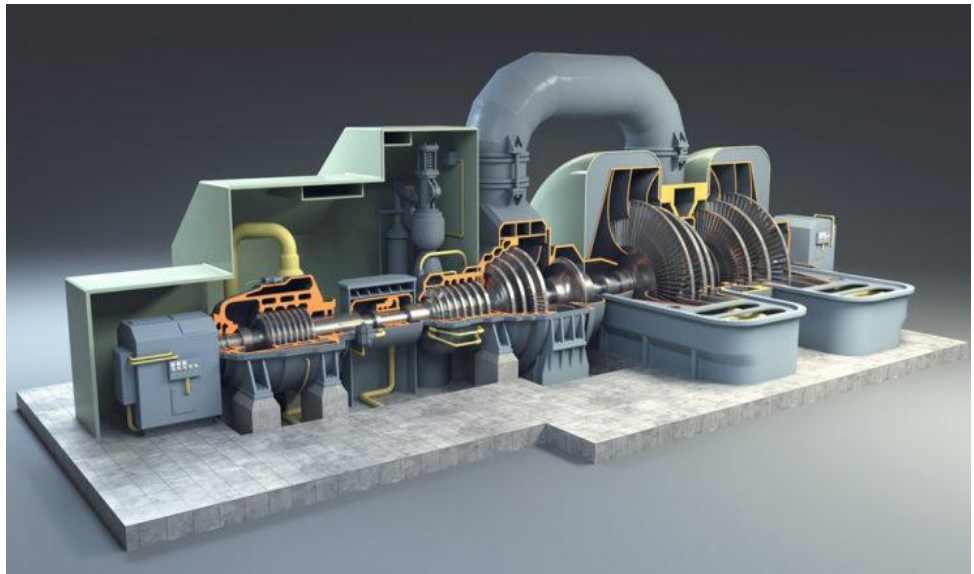
1.5.1. Ana Taşıyıcıya Göre

Kojenerasyon teknolojilerinin tahrik gücünü oluşturan ana taşıyıcılar genel olarak aşağıda verilmiştir. Her bir taşıyıcı karakteristik özelliklere sahip olmakla beraber çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahiptir.

- ✓ Buhar türbini
- ✓ Gaz türbini
- ✓ Mikro türbin
- ✓ Kombine çevrim
- ✓ Pistonlu içten yanmalı motorlar
- ✓ Gelişmekte olan teknolojiler
 - Stirling motorları
 - Yakıt hücreleri
 - Organik Rankine döngüsü

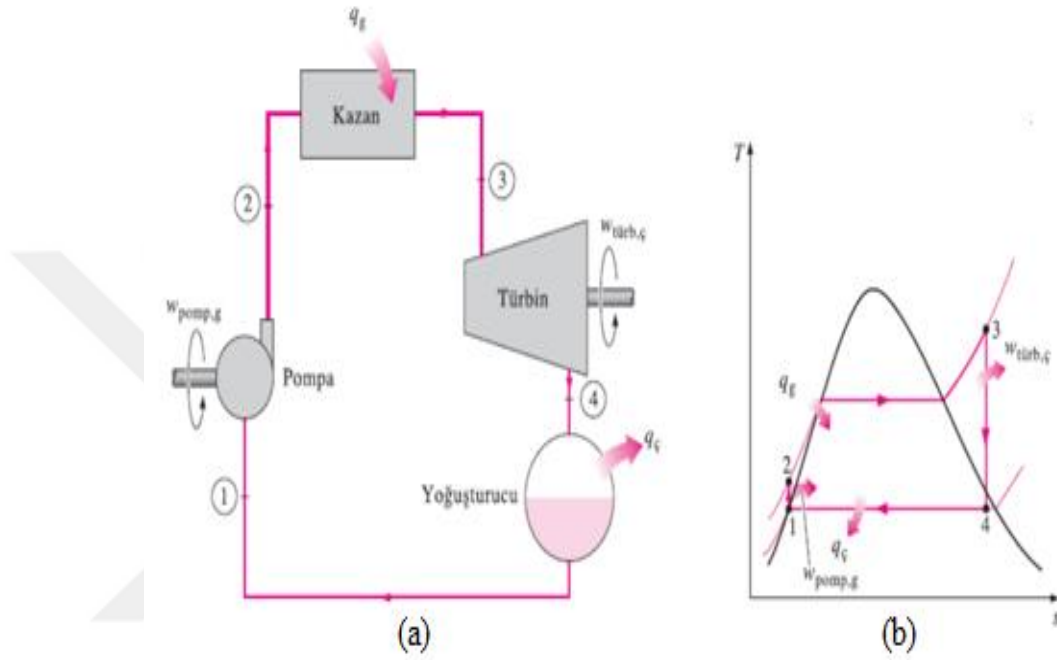
1.5.1.1. Buhar Türbinli Kojenerasyon

Buhar türbinli kojenerasyon sistemleri, uzun süredir kullanılan halen daha üretimde önemli bir paya sahip olan birincil taşıyıcı olarak kabul görmektedir [25].



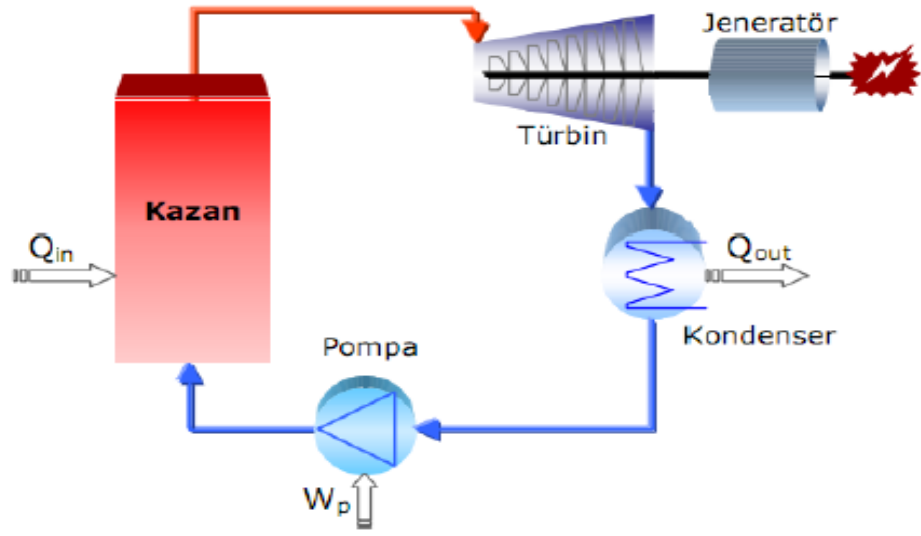
Şekil 1.14. Buhar türbininin genel yapısı [32]

Enerji üretim mekanizması son derece güvenilir ve kullanılabilir olmakla beraber güç kapasiteleri 50 kW' tan MW (yaklaşık 1300 MW) boyutlarına uzandığı için hem kojenerasyon hem de anlatılacak olan trijenerasyon teknolojilerinde geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Buhar türbinli kojenerasyon sistemlerinin temelini buharlı güç çevrimleri için ideal olan rankine döngüsü oluşturur [15,25].



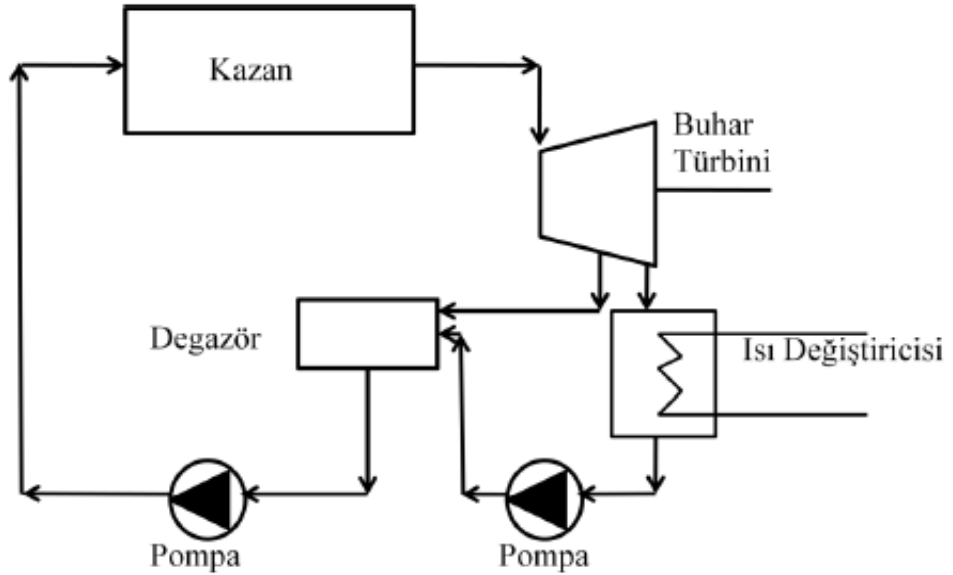
Şekil 1.15. Rankine döngüsü a) Çevrimin genel şeması, b) Çevrimin T-s grafiği [33]

Bu tip kojenerasyon sistemlerinde yakıttaki kimyasal enerji suyun istenilen sıcaklık ve basınca sahip olan buhara dönüştürülmesinde kullanılır. Buhar, türbinde istenilen seviyede genişleyerek mekanik işe dönüşerek jeneratörü hareket ettirir ve elektrik enerjisi üretilmiş olur. Basıncı ve sıcaklığı azalmış buhar kullanım bölgesine gönderilir [34].



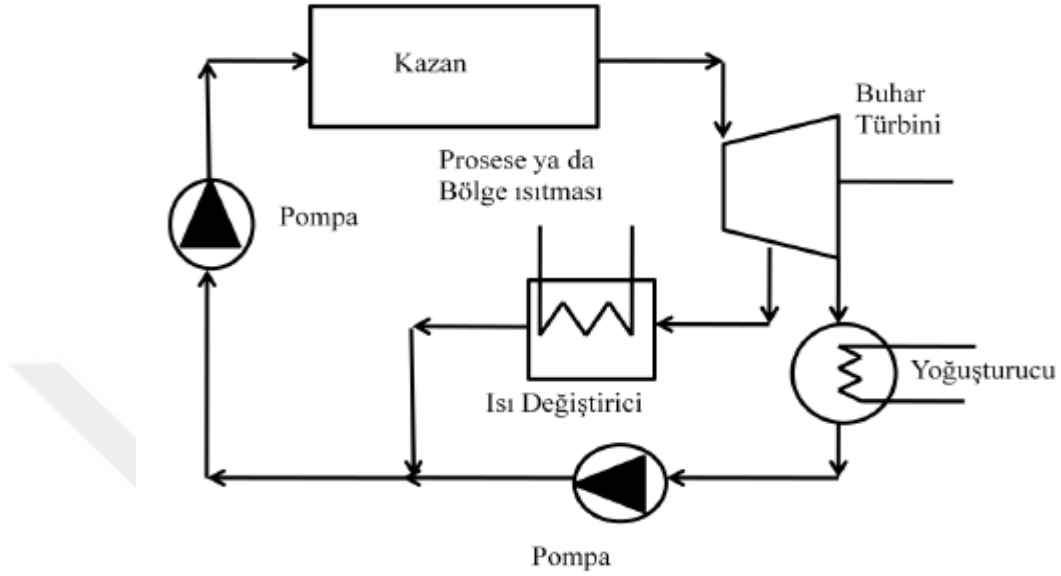
Şekil 1.16: Buhar türbinli kojenerasyon şeması [35]

Güç ve ısı talebi, ısı niteliği ve maliyet gibi faktörlere bağlı olarak kullanılabilen karşı basınçlı türbinli ve ara buhar almalı türbinli olmak üzere iki çeşit olarak incelenebilir. Karşı basınçlı türbinlerde tesisin enerji talebi doğrultusunda buharın türbinden çıkış sıcaklık ve basıncı (atmosfer basıncından az olmayacak şekilde) belirlenir. Gerekli zaman ise türbinden ara aşamalarda buhar alınarak kullanılabilir [34].



Şekil 1.17: Karşı basınçlı buhar türbini şeması [34]

Türbinden çıkan buharın yoğuşturucu basıncına kadar düşürüldüğü ara buhar almalı türbinli sistemlerde ise buharın bir kısmının ısı değiştiriciye giderek ısıl ihtiyacın karşılanmasında kullanılır [34].

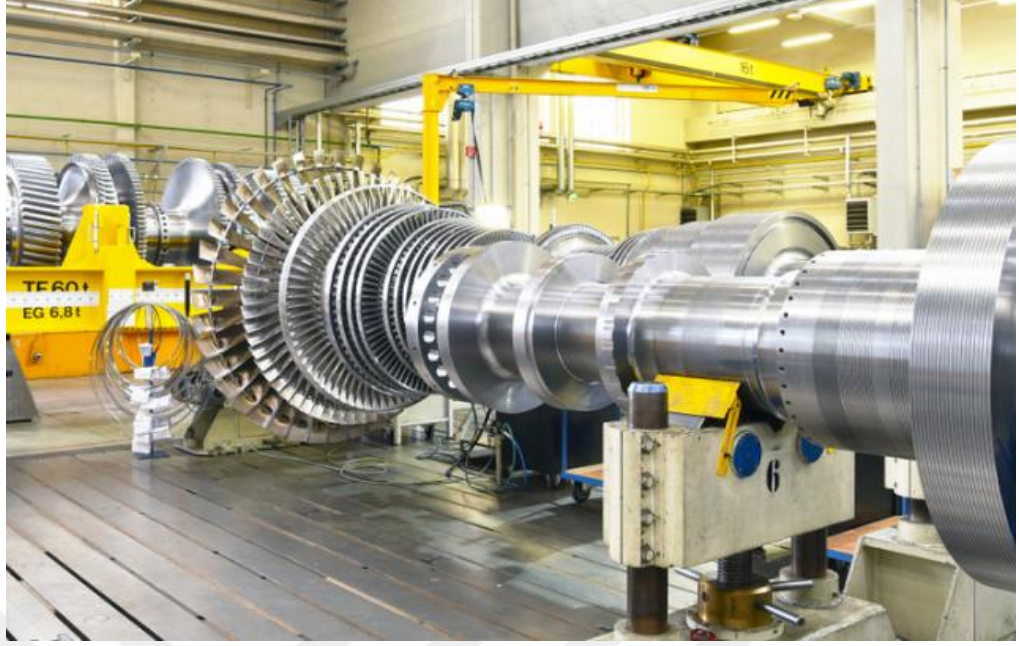


Şekil 1.18: Ara buhar almalı buhar türbini şeması [34]

Isı - elektrik oranının değişmediği yerlerde ara buhar almalı; değiştiği yerlerde ise karşı basınçlı türbinler tercih edilir [22]. Sudan buhar eldesi için fosil, biyokütle kaynaklı yakıtlar kullanılabildiği için farklı ana taşıyıcılara göre avantajlı görülebilir. Ancak yakıtların emisyon oranları hesaba katılarak çevreye etkilerini azaltmak için yapılan işlemler maliyeti arttırabilir [36]. Bunun yanında verim potansiyeli, güvenilirlik, uzun ömürlülük, güç üretim yelpazesinin geniş olması gibi olumlu özelliklerinin yanı sıra elektrik / ısı oranının düşüklüğü, maliyetin fazla olması gibi dezavantajları da vardır [37].

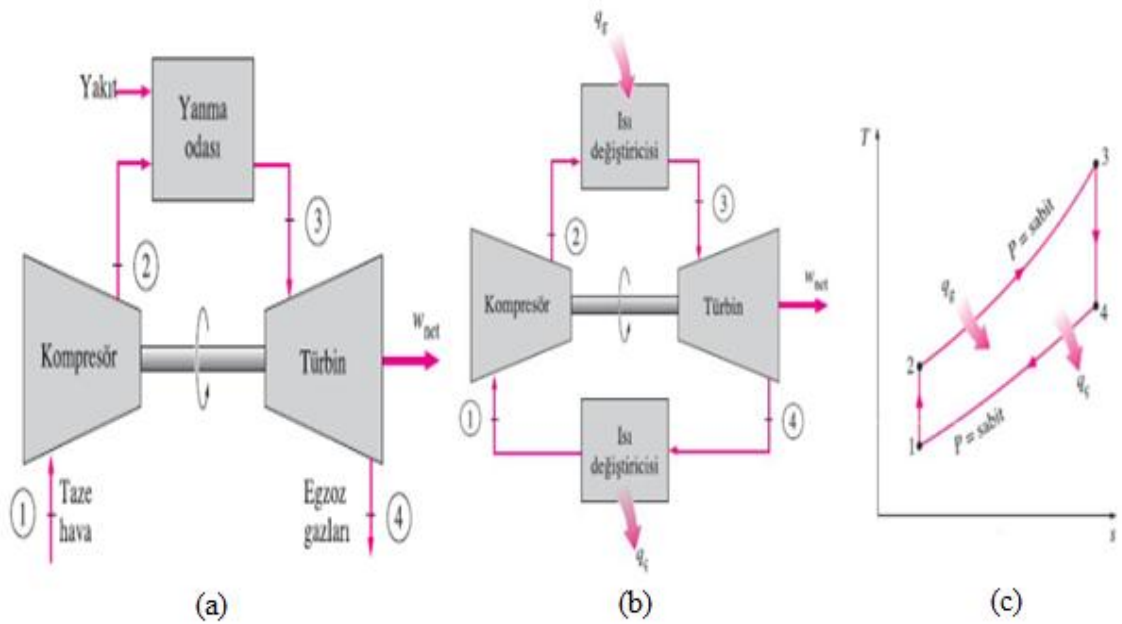
1.5.1.2. Gaz Türbinli Kojenerasyon

Gaz türbinli kojenerasyon teknolojileri türbin sistemlerinde meydana gelen ilerlemeler sayesinde hem verimleri artmış hem de daha az maliyetli olmuştur [36]. Dolayısıyla son zamanlarda büyük boyuttaki kojenerasyon sistemlerinde kullanım alanı en geniş olan birincil taşıyıcı olarak karşımıza çıkar [38].



Şekil 1.19: Gaz türbininin genel yapısı [39]

Bu tip kojenerasyon sistemleri atmosferik havanın sıkıştırıldığı, ısıtıldığı ve genişletildiği, türbini ve türbine bağlı olan jeneratörü tahrik etmek için basınç üreten brayton çevrimi ilkesine göre çalışır. Gaz türbinli kojenerasyon sistemleri doğalgaz, hafif fuel-oil veya dizel gibi yakıtlarla beslenirler [25].

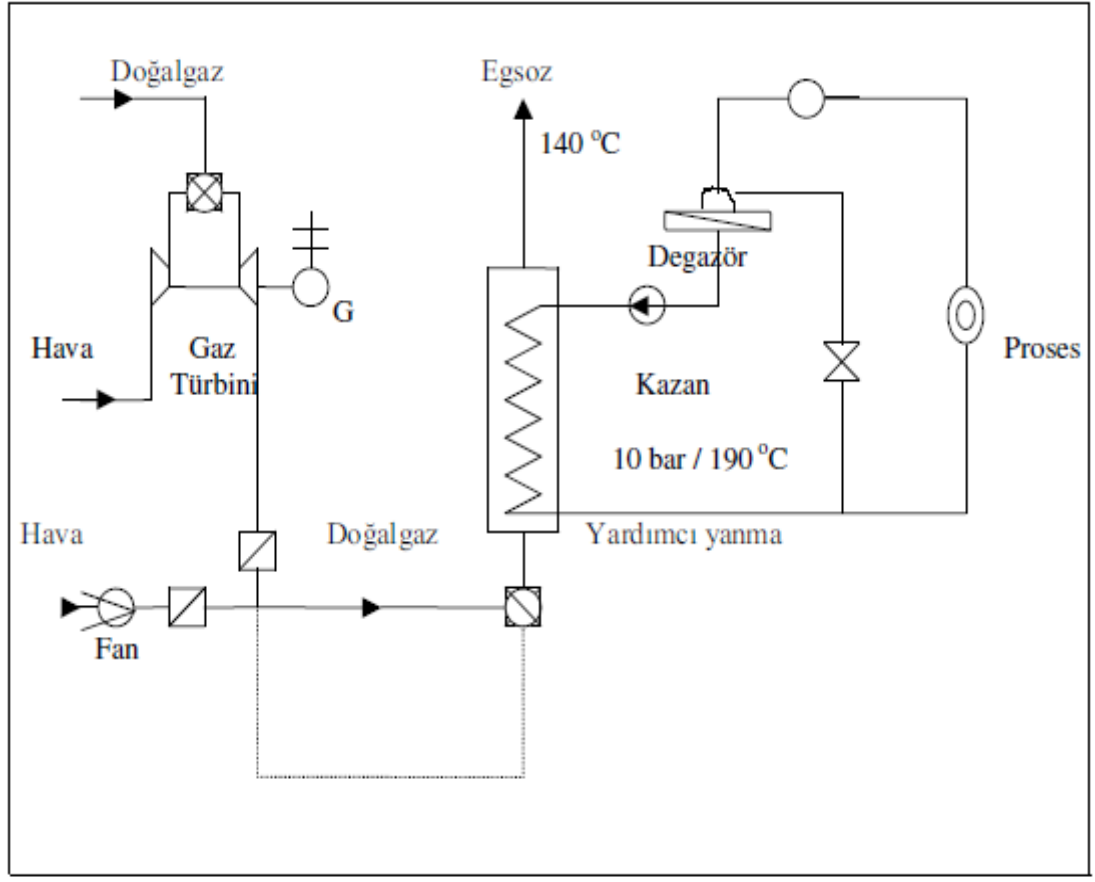


Şekil 1.20: Brayton döngüsü a) Açık çevrime göre çalışan brayton çevrimi, b) Kapalı çevrime göre çalışan brayton çevrimi, c) Brayton çevriminin T-s diyagramı [40]

Güç aralıkları bir kaç MW' tan 500 MW' a kadar değişebilmekle beraber elektriksel verimleri düşük olup % 24 - % 30 aralığındadır [20]. Temelde kompresör, yanma odası ve gaz türbininden oluşan bu kojenerasyon sistemlerinin çalışması yakıttaki enerjinin mekanik enerjiye; mekanik enerjinin ise elektrik enerjisine dönüşmesi ve egzoz ısısının kullanılabilir duruma getirilme ilkesine dayanır.

Kompresör tarafından basıncı ve sıcaklığı arttırılan havanın yanma ünitesinde yakıt sayesinde yanması sağlanarak oluşan yanma gazı / egzoz gazı türbine giderek burada genişler. Oluşan mekanik enerji çevrimi tamamlamak üzere bir yandan kompresörü ve bir yandan da jeneratörü destekleyerek elektrik enerjisi üretilmek üzere kullanılır. Yaklaşık olarak 400 - 600 °C sıcaklığına sahip egzoz gazındaki atık ısı direkt proses uygulamalarında veya ısı kazanım ünitelerinde buhar ve / veya kızgın su üretiminde kullanılır [41].

Gaz türbinli kojenerasyon tesislerinde yüksek ısı gücü oluşmaktadır. Isıl gücün kullanımı ile ilgili çeşitli alternatifler mevcuttur. Bunlar, egzoz gazlarındaki ısının proses işlemlerde (ısıtma, kurutma vb.), absorpsiyonlu soğutucu desteğiyle elde edilen soğutma gücünün de elde edildiği trijenerasyon sistemlerinde de kullanıldığı ısı geri kazanımlı gaz türbin çevrimi ve buhar - sıcak su kazanında üretilmiş buharın bir bölümünün yanma ünitesi - türbin sistemlerine giderek güç üretimine yardımcı olması sebebiyle verimin önemli ölçüde arttığı cheng çevrimidir. Cheng çevrimine buhar enjekte edilmiş gaz türbinli çevrim de denir [41]. Gaz türbinli kojenerasyon teknolojilerinde egzoz gazındaki yüksek oksijen yoğunluğu sebebiyle termal verimi arttırmak amacıyla hava gereksiz ilave bir yakıtla ikinci yanma olayı sağlanabilir. Bu olayın gerçekleştiği ısı kazanım ünitelerine ek yanmalı ısı kazanımı adı verilir [42].



Şekil 1.21: Gaz türbinli kojenerasyon sistemi şeması [13]

Biyokütle kaynaklı yakıtlar, sıvı yakıtlar, gaz yağı, Fuel - oil, destilasyon işlemi sonucu oluşan yağlar, sıvılaştırılmış petrol gazı gibi yakıtların kullanılabilir. Ancak gaz türbinli kojenerasyon uygulamalarında en çok doğalgaz kullanılır [41].

Yakıt esnekliği, titreşim ve gürültü oranlarının fazla olmaması, bakımlarının kolay ve maliyetli olması, sıcaklığın az olduğu havalarda yüksek güç üretebilmeleri fazla olduğu havalarda ise yüksek ısı üretimi, ısı / güç değerinin esnetilebilmesi, soğutma suyu ihtiyacının olmaması gibi avantajları vardır. Bu avantajlarının yanında verimlerinin az olması (özellikle düşük yüklerde), kullanılacak yakıtın gaz olması durumunda ilave basınç ekipmanlarına ihtiyaç güç eldesinin tasarımsal olarak değişmesi gibi olumsuzlukları da mevcuttur [22].

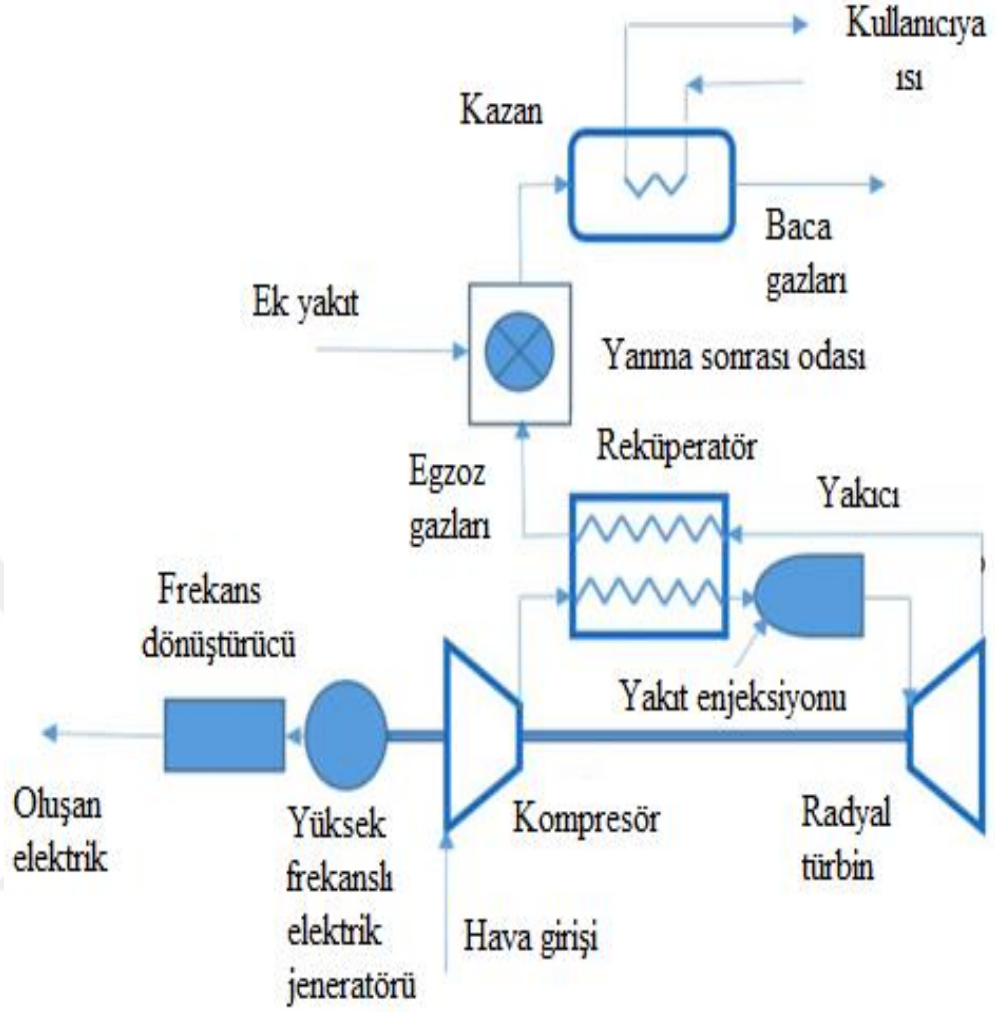
1.5.1.3. Mikro Türbinli Kojenerasyon

Mikro türbinler küçük boyutlu gaz türbinleri olarak tanımlanabilirler. Mikro türbinler ilk olarak 1970 yılından önce piyasaya çıkmasına rağmen otomotiv sektöründeki motorlara bir üstünlük gösterememişlerdir. 1990' lı yıllarında otomotiv sektöründeki türbin teknolojisinin durması, kojenerasyon uygulamalarındaki artıştan dolayı mikro türbin kavramı ilgi görmeye başlamıştır [43].



Şekil 1.22: Mikro türbinin genel görünümü [18]

Temeli Joule - Brayton döngüsüne dayanan mikro türbin sistemleri genel itibariyle kompresör, yanma odası, türbin ve jeneratörden meydana gelmektedir. Boyutları 30 ile 400 kW arasında değişiklik gösterebilir [44]. Kompresörde yaklaşık 3 - 5 bar basınca sıkıştırılan hava yanma biriminde yakıt ile yakılır ve sonuçta oluşan yanma gazları türbine girer. Yanma gazlarının sıcaklığı 900 °C - 950 °C civarlarındadır. Kompresörün harcadığı enerjiden daha fazla enerji üreten türbinde gazlar genişleyerek basıncı düşer ve kompresör türbin arasındaki bu fazlalık enerji jeneratörü tahrik eden şaft gücüne aktarılır. Türbini terk eden gazların yüksek sıcaklıkları nedeniyle reküperatör kullanımı türbin veriminin artmasına neden olacaktır. Günümüzde tek şaftlı ve çift şaftlı olmak üzere 2 tip mikro türbin sistemi vardır [45]. Tek şaftlı olan mikro türbinde, kompresör, türbin ve jeneratör üçlüsü aynı tek bir şaft üzerinde olur. Hareketli parçanın tek olduğu ve dolayısıyla güvenilir olan bu tasarımda yüksek hızlarda çalışma ve değişken elektrik üretebilme potansiyeli mevcuttur. İki şaftlı tasarımlar ise bir türbin kompresörü diğer türbin ise jeneratörü tahrik edecek şekilde tasarlanır. Genellikle tek şaftlı sistemler daha fazla kullanılmaktadır [25].



Şekil 1.23: Mikro türbinli kojenerasyon santrali şeması [43]

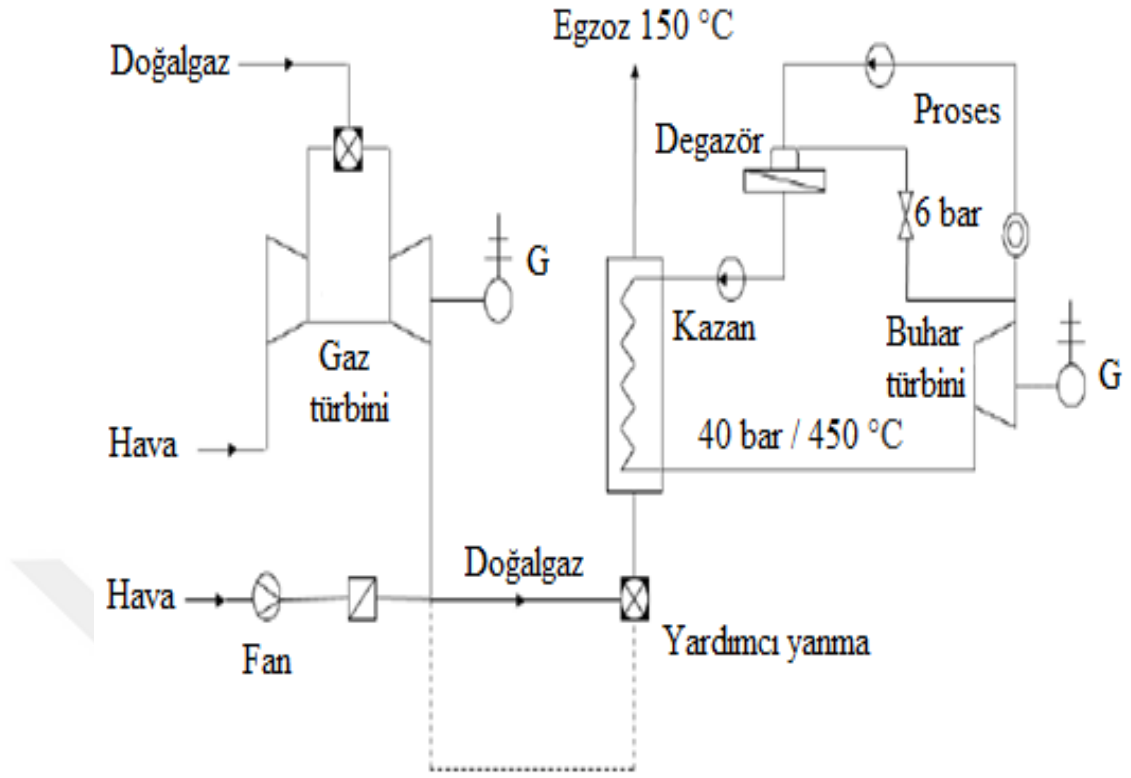
Konutsal uygulamalarda (hastane, fabrika, ofis vb.) elektrik, sıcak su veya proses ısı amacıyla kullanılabilirler. Çeşitli yakıtlarla (LPG, fuel-oil, benzin, dizel vb.) çalışabilmelerine rağmen gaz türbinlerinde olduğu gibi genellikle yakıt olarak doğal gaz tercih edilir. Tam yükte bile emisyon oranının düşük olması, titreşim ve gürültü seviyelerinin düşük olması, ömürlerinin fazla olması, güvenilirlik, termik verimlerinin yüksek ve nitelikli olması, düşük bakım masrafları gibi avantajlarının yanında içten yanmalı motorlara göre mekanik verimlerinin düşük olması, nitelikli yakıt gereksinimi, güç değişkenliğine cevap verememesi gibi zayıf yönleri de bulunmaktadır [43].

1.5.1.4. Kombine Çevrimli Kojenerasyon

İki termodinamik çevrimden oluşan bu sistemlerin en yaygın olarak kullanılanı gaz türbini ve buhar türbini teknolojisini birleştiren uygulamalardır. Gaz türbininin çevrimi olan Joule - Brayton döngüsü ile buhar türbininin çevrimi olan Rankine döngüsü Kombine çevrimlerin temelini oluşturmaktadır [25]. Dolayısıyla bu sistemlerin temel elemanları türbinler (gaz ve buhar), jeneratörler, kompresörler ve ısı kazanım birimleridir.

Brayton çevriminin üst, Rankine çevriminin ise alt döngüyü oluşturduğu kombine sistemlerde Brayton çevrimine ait egzoz gazı yani atık ısı Rankine çevrimine girerek termal kaynağı oluşturur. Yanma sonucu oluşan yüksek sıcaklığa sahip gazın girdiği gaz türbini ile çeşitli aşamalardan sonra düşük sıcaklıktaki buharın çıktığı buhar türbinini bir araya getirerek güç üretiminde yüksek verime ulaşır. Sistemden talep edilen termal enerji ise ısı kazanım ünitesinden veya alt çevrimdeki türbinden yani buhar türbininden alınan ısıyla giderilebilir [46]. Çevreden alınan hava gaz türbinine ait olan kompresöre girerek burada yüksek basınç ve sıcaklığa getirilip yakıt ile yanması için yanma ünitesine gönderilerek yanma olayı gerçekleşir ve bunun sonucu oluşan yanma gazları türbine giderek jeneratör vasıtasıyla elektrik üretimini sağlar. Türbini terk eden egzoz gazı ısı kazanım biriminde değerlendirilmesiyle oluşan buhar, buhar türbinine girerek türbin kanatlarından geçmesiyle türbin miline mekanik enerji kazandırıp jeneratörde elektrik enerjisi üretilmiş olur. Basıncı ve sıcaklığı azalmış vaziyette türbinden çıkan buhar ısı talepleri doğrultusunda değerlendirilir.

Elektriksel verim fazla olduğu için elektriksel ihtiyacın ısı talepten daha fazla olduğu yerlerde kullanılabilir. Sistemde bulunan fazla ekipman bakım ve ilk yatırım masraflarının artmasına neden olur.



Şekil 1.24: Kombine çevrimli kojenerasyon şeması [13]

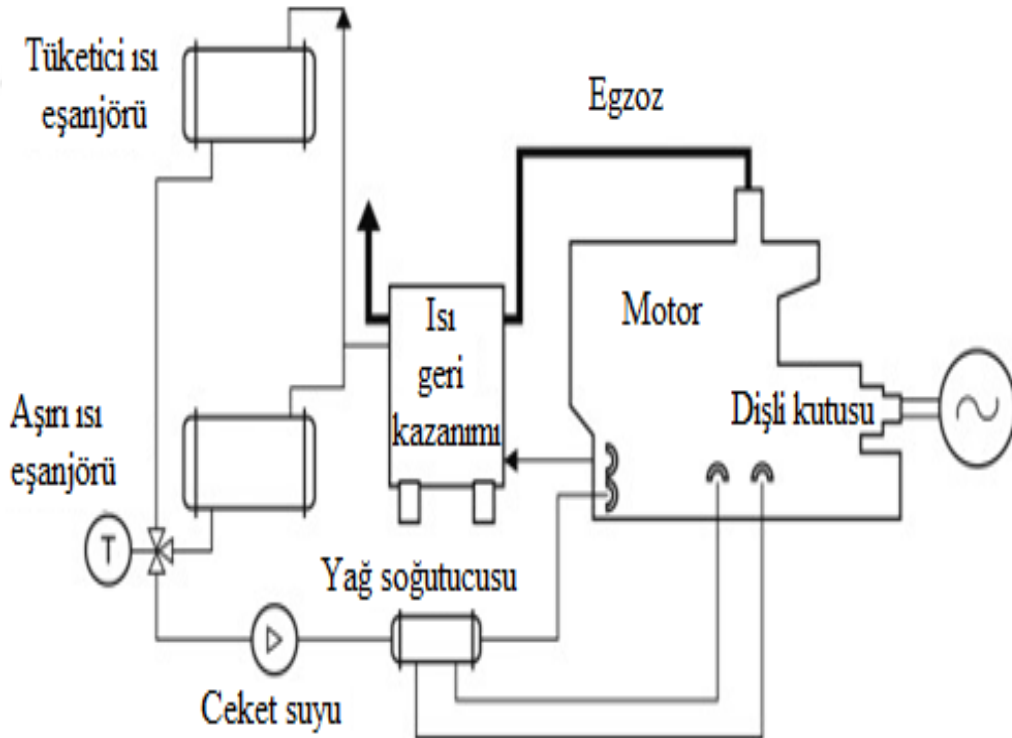
1.5.1.5. Pistonlu İçten Yanmalı Motorlu Kojenerasyon

İçten yanmalı pistonlu motor yakıtın sınırlı ve silindirik bir bölge olan yanma ünitesinde yanması sonucu oluşan basıncın piston denilen elemana hareket enerjisi kazandırmasıyla meydana gelen mekanizmadır [47]. Yakıt, hava, sıkıştırma ve yanma tahriki bu motorların çalışması için olması gereken kaynaklardır [11].

Yüzyıldan uzun süredir teknolojiyle paralel sürekli gelişmekte olan bir teknoloji olarak karşımıza çıkan içten yanmalı motorlar ulaşım sektörü, sabit güç üretim teknolojisi, kojenerasyon, trijenerasyon gibi birçok alanda tercih edilmektedir [48]. Mükemmel yakıt dönüşüm verimi, yatırım maliyetlerinin az olması, güç / ağırlık ve verimlilik / maliyet gibi oranların yüksek olması, güvenilir olmaları, değişen yük ihtiyaçlarına çok iyi karşılık verip iyi dinamik özellik sağlamaları gibi önemli avantajlarından dolayı küçük ve orta ölçekteki kojenerasyon uygulamalarında ilgi çekici hale gelerek ana

taşıyıcı olarak birleşik ısı ve güç sistemlerinde en uygun teknoloji konumundadır. Bunun yanında gürültü ve titreşim seviyelerinin fazla olması, bakım ve işletme maliyetinin nispeten fazlalığı, Kirletici emisyon (NO_x gibi) oranlarının azaltılması için katalizör ihtiyacı gibi zayıf yönleri de bulunmaktadır [43,48]. Genellikle 5 MW' tan küçük sistemlerde tercih edilen bu teknolojilerde ısıl gücün birden fazla bölgede çıkması ve ısı enerjinin az olması durumları en zayıf noktasıdır [42]. Rakiplerine göre güç üretimi olarak verimli olup, ısı kazanım noktasında ise küçük ölçekteki tesisler için verimli olan pistonlu motorlu kojenerasyon sistemleri elektriksel talebin ısı talepten yüksek olduğu birimlerde daha yaygın bir şekilde kullanılırlar [22].

Hava ve yakıt karışımının silindirik ortamda yanmasıyla oluşan yüksek basınçlı gazın silindirin içine konumlandırılmış pistonu hareket ettirerek güç krank mili vasıtasıyla çıkış miline aktarılır. Elektrik kontrolü yada eksantrik mili ile çalıştırılabilen valfler yakıt - hava karışımının silindire girmesini ve yanma ürünlerinin dışarıya atılmasını sağlar [43].

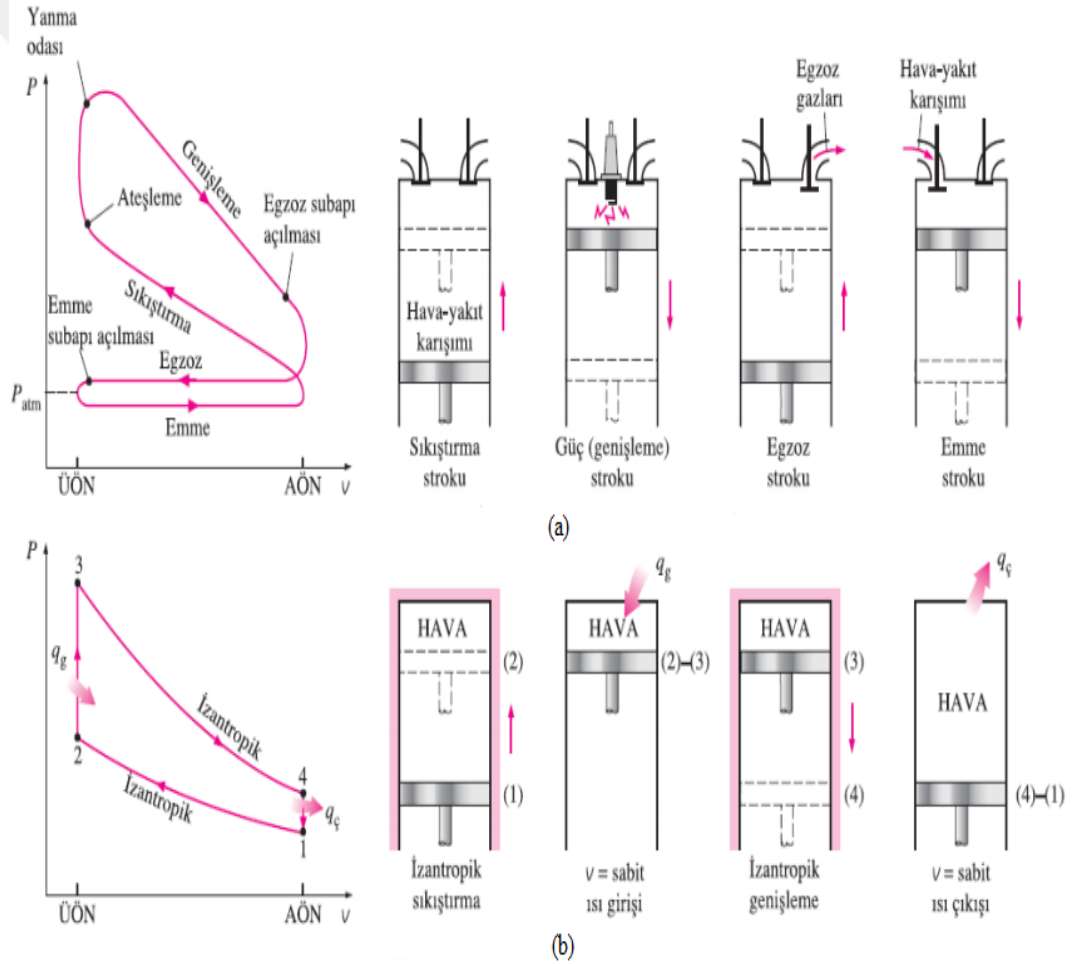


Şekil 1.25: Pistonlu motor tahrikli kojenerasyon şeması [15]

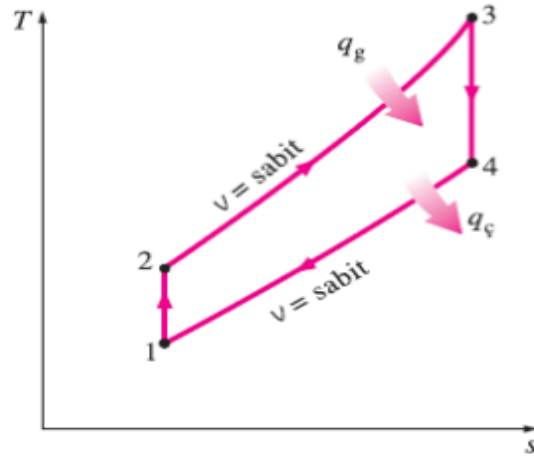
İçten yanmalı pistonlu motorlar ateşleme etkisine göre iki grupta incelenebilir. Bunlar:

- ✓ Otto çevrimine göre çalışan kıvılcım ateşlemeli motorlar (Gaz motorlu)
- ✓ Diesel çevrimine göre çalışan sıkıştırma ateşlemeli motorlar (Dizel motorlu)

Gaz motorlu kojenerasyon: Sıkıştırma sonucunda yakıt - hava karışımının yanması için kıvılcım üretilerek yanma olayının gerçekleştiği Gaz motorlu kojenerasyon sistemleri otto çevrimine göre çalışmaktadır. Silindirde sıkıştırılmış olan yakıt - hava karışımının buji denem parçanın kıvılcımıyla yanması sonunda oluşan gazlardan motorda mekanik güç elde edilir.

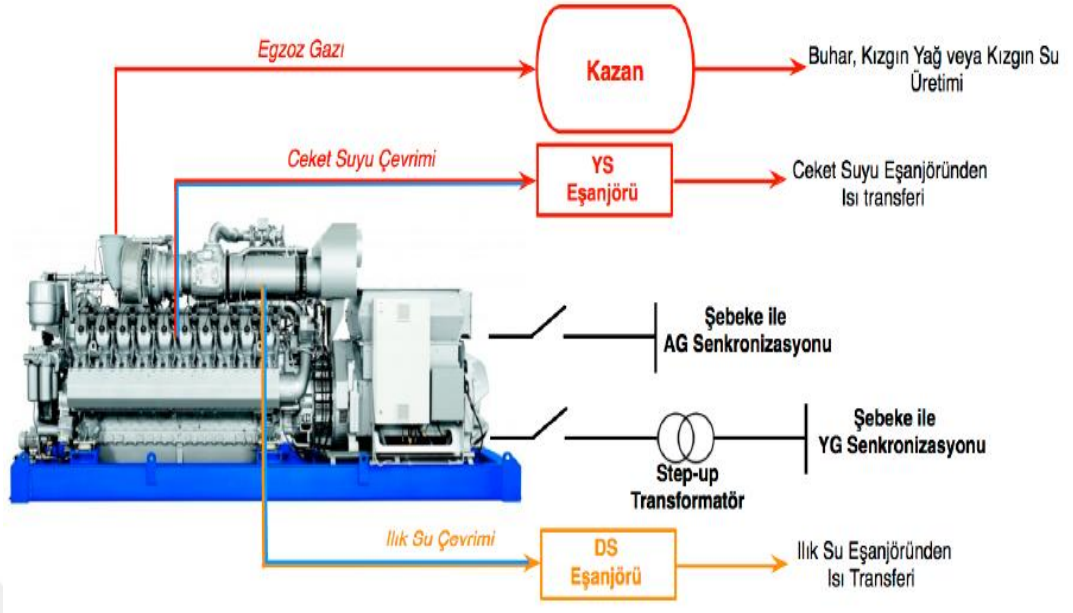


Şekil 1.26: Otto çevrimi a) Gerçek buji ateşlemeli çevrim, b) İdeal buji ateşlemeli çevrim [40]



Şekil 1.27: İdeal otto çevriminin T-s diyagramı [40]

Gaz motorlarda ısının geri kazanımı 5 farklı bölgeden yapılarak hem ısı ihtiyaçların karşılanarak toplam verimin artması hem de motorun sıcaklıktan zarar görmesi engellenmiş olur. Yaklaşık 40 °C lik ortamda çalışan ve yanma olayının gerçekleştiği motorlar enerjinin tamamını kullanılabilir hale getiremeyip enerjinin bir kısmı motorun ısı iletim yolları sayesinde ısınmasını sağlar. Yakıt ile karıştırılacak havanın sıcaklığının yüksek olması motorun iyice ısınmasına neden olacağından kullanılacak hava sıcaklığı 25 °C olmalıdır. Basıncının sabit tutulduğu gazın sıcaklığının artmasıyla hacmi de artacağından sıcak havanın silindirde sıkıştırılması zor olacağından verimi düşer. Bu şekilde havanın sıcaklığının kontrol altına alınarak yapılan ısı kazanımına yanma havasının soğutulması ile ısı kazanımı adı verilir. Yağlama yağından ısı geri kazanımı % 10 civarlarında olur. Yağın sıcak olması yağın ömrünü kısaltırken soğuk olması ise ısı kazanım verimini düşürür. Bu nedenle yağın belli sıcaklık değerlerinde (70 - 95 °C) olması gerekir. Motorun aşırı ısınmasını engellemek amacıyla motorda ceket suyu gezdirilir. Ceket suyu toplam enerjinin yaklaşık % 30 - % 35' ini motordan çekerek bu ısının büyük bir kısmını geri kazandırılır. Egzoz gazları ile sistemi terk eden ısı ile sıcak su ve / veya buhar elde edilerek ısı geri kazanılabilir. Ekonomizer de yararlanılan duman gazında, halen daha yararlanılabilecek enerji mevcuttur. Bu yüzden bu gazdan da ısı geri çekilebilerek verim iyice arttırılmış olur [22]. Farklı yollarla geri kazanılan bu ısı enerjisi buhar üretimi, sıcak su üretimi, kurutma, alan ısıtma gibi proseslerde kullanılabilir [27].



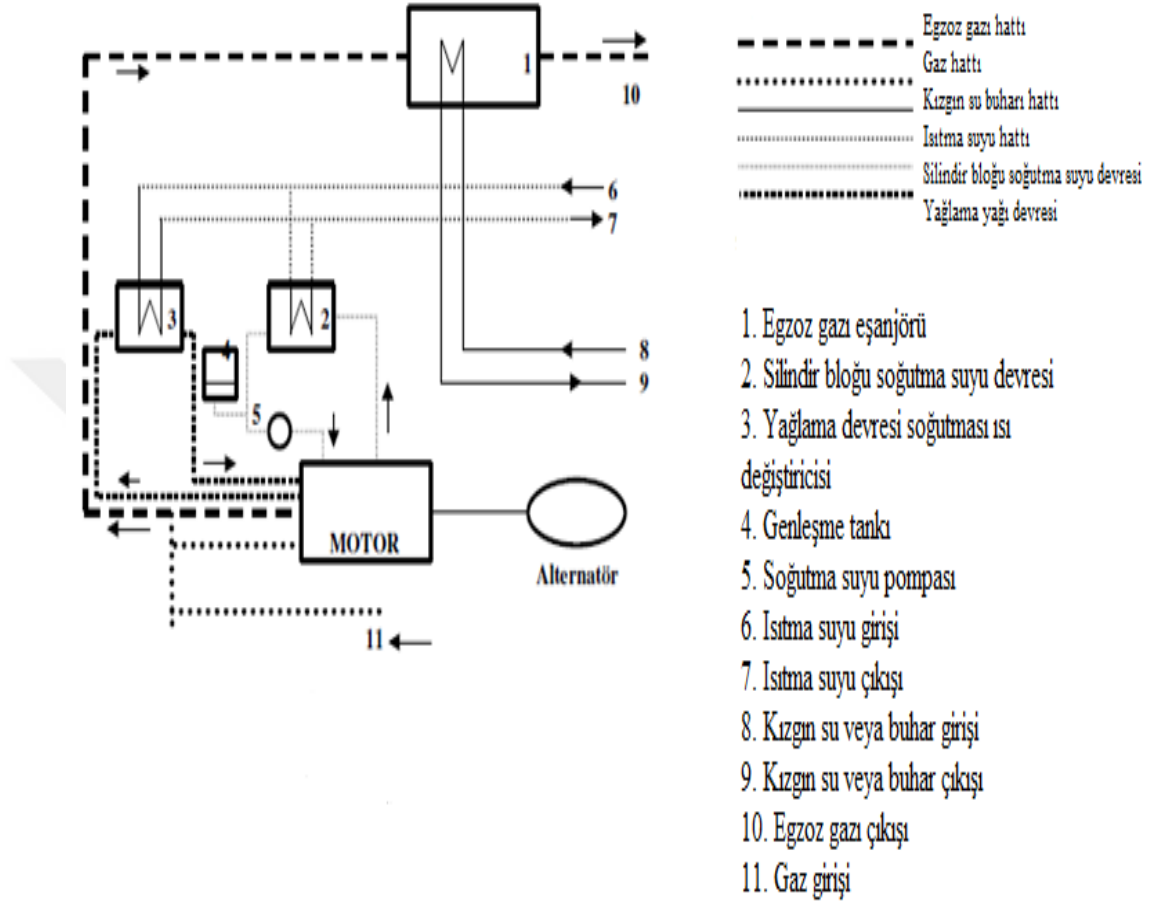
Şekil 1.28: Gaz motorlu kojenerasyon santrali

Güç aralıkları 15 kW ile 10 MW arasında değişebilen ve yaklaşık elektriksel verim olarak % 40, termal verim olarak % 50 değerlerine ulaşabilen gaz motorlu kojenerasyon sistemleri türbinli sistemlere göre 3 MW altı güçlerde daha verimli ve avantajlı olabilmektedir. Yakıt esnekliğine rağmen (LPG, propan, çöp gazı, kok gazı, biyo gaz vb.) genellikle doğal gaz tercih edilmektedir [36,42].

Gaz motorlu kojenerasyon sistemlerinin avantajları şu şekilde sıralanabilir [49]:

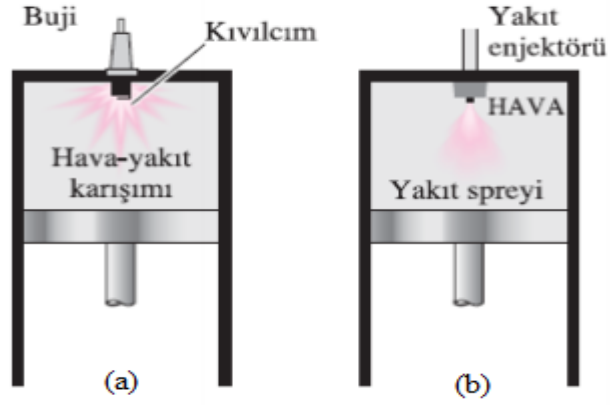
- ✓ % 40' lara dayanan yüksek elektriksel verim
- ✓ Elektriksel verimin artmasıyla toplam verimin düştüğü türbinli çevrimlere göre daha iyi bir alternatif olması
- ✓ Doğal gaz, fakir karışım ve / veya katalizör gibi faktörlerin bir araya gelmesi sonucunda kirletici gaz emisyonunun azalması
- ✓ Motorun tam yükte çalışmadığı durumlarda bile verimin kayda değer etkilenmemesi
- ✓ Çok modüllü yapılandırılma sayesinde değişken elektrik - ısı taleplerine cevap verebilmesi ve bunun sonucunda oluşan ekonomik katkı
- ✓ Motoru devreden çıkarmak ve tekrar sisteme dahil etmek kolaydır
- ✓ Yakıt esnekliği (biyogaz, kok gazı, LPG, atık gazlar vb.)

Gaz motorlu kojenerasyon sistemleri elektriksel talebin ısı talepten yüksek olduğu küçük ve orta büyüklükteki konutlarda (fabrika, hastane, ofis, üniversite yerleşkeleri vb.) kullanılabilir.

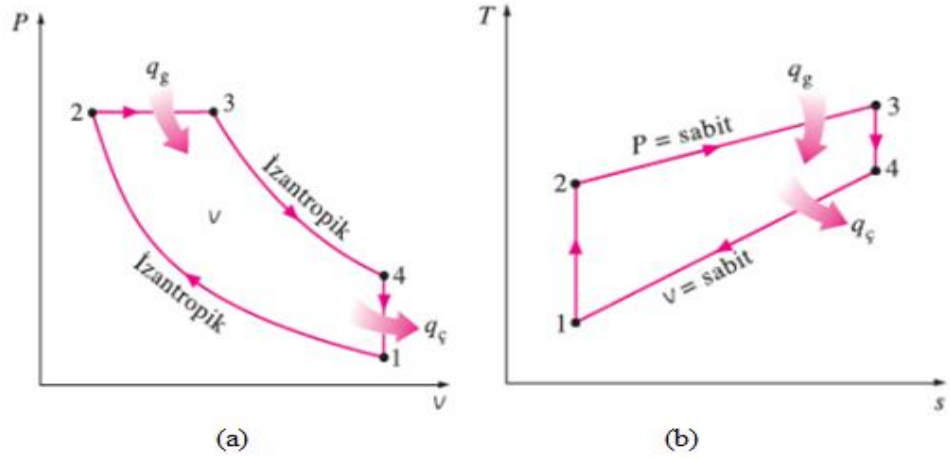


Şekil 1.29: Gaz motorlu kojenerasyon sistemi akış şeması [13]

Dizel motorlu kojenerasyon: Havanın silindirde sıkıştırılarak yakıtın kendiliğinden tutuşması için yüksek basınçta püskürtülerek yanma olayının gerçekleştiği bu sistemler Dizel çevrimine göre çalışır. Yanma sonrası meydana gelen gazlar silindirde pistonları hareket ettirerek mekanik güce dönüşür. Dizel motorlara sıkıştırma ateşlemeli motorlarda denir.

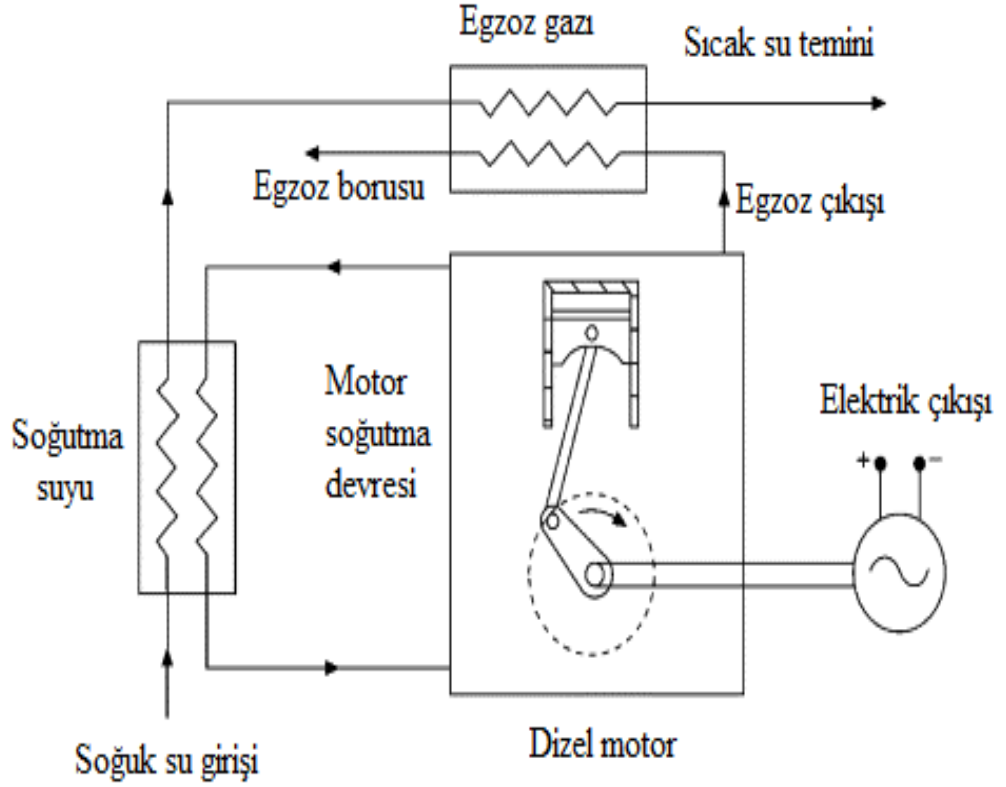


Şekil 1.30: İçten yanmalı motorlarda yanma olayı a) Kıvılcım ateşlemeli motor, b) Sıkıştırma ateşlemeli motor



Şekil 1.31: Diesel çevrimi a) Çevrimin P-v diyagramı, b) Çevrimin T-s diyagramı

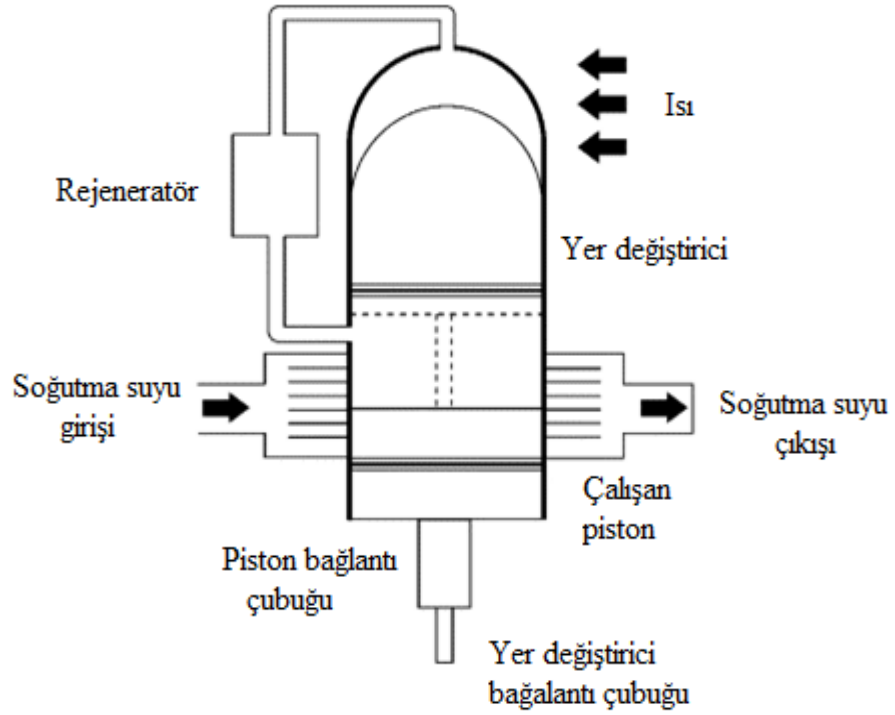
Dizel motorlu kojenerasyon sistemlerinin güç aralıkları 0,5 kW ile 10 MW aralığında, ısıl verimleri % 40 - % 50 civarlarında olup elektriksel verimleri % 50 ye kadar olabilmektedir. Gaz motorlara göre daha maliyeli ve kirli (egzoz gazı kirleticileri) olup verimleri daha yüksektir. Yakıt olarak genellikle motorin (dizel) kullanılır [30, 50].



Şekil 1.32: Dizel motorlu kojenerasyon şeması [48]

1.5.1.6. Stirling Motorlu Kojenerasyon

İskoçya Kilise bakanı rahip Reverent Robert Stirling tarafından 1816 gibi uzun bir zaman önce icat edilip motordaki iç elemanlar yakıtı görmediği için her çeşit yakıtın yanmasına olanak veren kapalı çevrimli dıştan yanmalı bir motordur [17]. Mikro kojenerasyon uygulamaları 21. yüzyılın sonlarına doğru hızlanmaya başlamış ve günümüzde de gelişimine devam etmektedir. Mikro boyuttaki kojenerasyon uygulamalarının bir takım zorluklarına en umut verici alternatif olarak Stirling motorları görülmektedir [51].

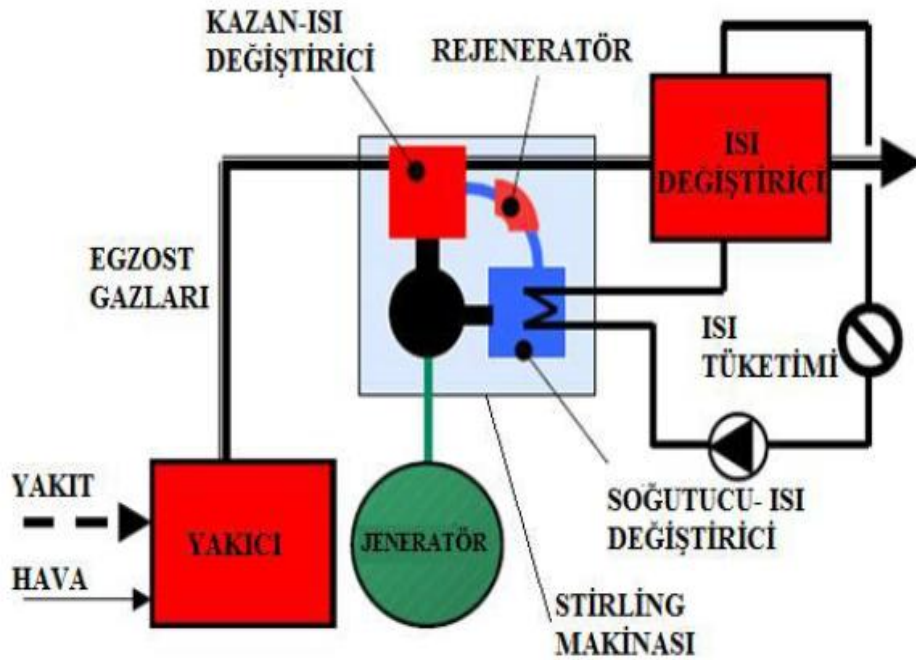


Şekil 1.33: Stirling motorunun genel yapısı [51]

Mikro kojenerasyon uygulamalar 21. yüzyılın sonlarına doğru hızlanmaya başlamış ve günümüzde de gelişimine devam etmektedir. Mikro boyuttaki kojenerasyon uygulamalarının bir takım zorluklarına en umut verici alternatif olarak stirling motorları görülmektedir. Temel olarak silindir, piston, yer değiştirici ve rejeneratör kısımlarından oluşan stirling motorunun çalışabilmesi için valf veya ateşleme sistemini içermesi zorunlu değildir. Temelde carnot döngüsüne göre çalışan stirling motoru silindirinin bir ucu sürekli sıcak diğer uç ise soğuk kalmaya zorlanır. Yakıt sürekli yanarak silindirin bir ucunu sıcak, diğer uçta ise soğutma suyu dolaştırılarak soğuk tutulur. Silindirin içerisinde hava helyum yada hidrojen gazı bulunabilir. Motor içerisinde sızdırmaz yalıtımlı bir ortamda bulunan gaz maddenin yakıtın yanmasıyla sıcaklığı ve basıncı artarak genişler. Bu etkiyle pistonu kuvvet uygulayarak mekanik güç vermiş olur. Soğutma suyu yardımıyla soğutulan uçta ise tam tersi bir olay meydana gelerek basıncı düşen gaz pistonu sıkıştırmak için zorlar. Bu şekilde sırayla ısıtılıp soğutulan gaz basınç dalgalanmaları sebebiyle pistonu hareket yeteneği kazandırarak güç elde edilir. Soğutma sırasında gazdan çekilen ısının tekrar ısıtma işlemine döndürülmesi için rejeneratör kullanılır ve ısı verimliliği artar [51].

Stirling motorlarının içten yanmalı motorlardan farkı yanmanın harici odada gerçekleşmesi ve ısı girişi ile güç çıkışı arasında gecikmenin olmasıdır. Stirling motorlarından yanma olayı motorun dışında gerçekleştiğinden fosil yakıtlar (doğalgaz, benzin vb.) biyoyakıtlar, yenilenebilir yakıtlar (güneş enerjisi vb.) gibi kaynaklarla beslenir ve dolayısıyla yakıt yelpazesi genişir [43]. Elektriksel verim % 13 - % 28 arasında değişmekle birlikte genel verimlilik % 80' den fazladır. Mikro kojenerasyon sistemlerinde 10 kW - 25 kW kapasite aralıklarında stirling motorları kullanılabilir [25].

Stirling motorları yüksek genel verimlilik, düşük gürültü ve titreşim seviyesi, uzun bakım aralıkları, düşük emisyon oranları gibi avantajları vardır. Ancak bu avantajlarının yanında elektriksel verimin düşüklüğü, yatırım maliyeti, ısı eşanjörlerinden dolayı gücün kontrol sistemini zorlaştırması gibi zayıf yönleri de vardır [25].

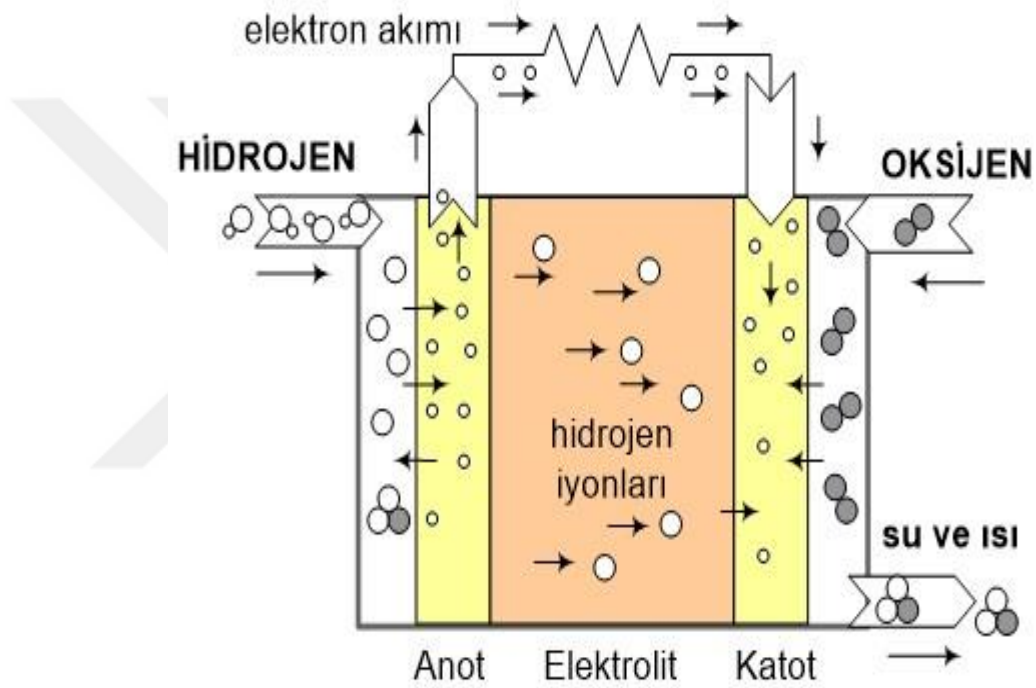


Şekil 1.34: Stirling motor tahrikli kojenerasyon sistemi [41]

1.5.1.7. Yakıt Hücreli Kojenerasyon

1800' lü yıllarda ortaya çıkan ve o tarihlerde fazla ilgi odağı olarak görülmeyen yakıt pilleri İkinci Dünya Savaşından sonra araştırma çalışmalarının ilgi odağı haline

gelmiştir. Yakıttaki kimyasal enerjiyi herhangi bir yanma gerçekleşmeksizin doğrudan ısı ve elektriğe çeviren elektrokimyasal cihazlardır. Yakıt hücreleri temelde seri bir şekilde birbirine bağlanan negatif elektrot (anot), pozitif elektrot (katot) ve elektrolitten meydana gelir. Yakıt hücrelerinin anot kısmına yakıt, katot kısmına ise hava yani oksijen aralıksız olarak gelmektedir. Elektrolitler burada iyon olan atomların geçişine izin verip, elektronların ise geçişine engel olarak elektronların harici bir devre üzerinden akmasını sağlayarak elektrik üretimi sağlanmış olur. Bir yakıt pilinde Anotta indirgenme, katotta ise yükseltgenme tepkimeleri gerçekleşir [52].



Şekil 1.35: Yakıt pilinin genel yapısı [53]

Yakıt pillerinde meydana gelen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir.

- ✓ Anot : $H_2 + O^{2-} \Rightarrow H_2O + 2e^-$
- ✓ Katot : $\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \Rightarrow O^{2-} + ısı$
- ✓ Toplam : $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \Rightarrow H_2O$

Yakıt olarak direkt hidrojen yada hidrojenin elde edilebildiği kaynakların (doğalgaz, kömür, propan, biyokütle vb.) yeniden biçimlendirilmesiyle veya suyun elektrolizi sonucunda oluşan hidrojen kullanılabilir [54]. Kullanılan elektrolit çeşidine göre yakıt

pilleri sınıflandırılır. Yakıt hücrelerine ait özellikler Tablo 1.1' de verilmiştir. Ticari olarak geliştirilmiş yakıt pilleri 5 grupta incelenip bunların tümü kojenerasyon uygulamalarında kullanılabilir [20].

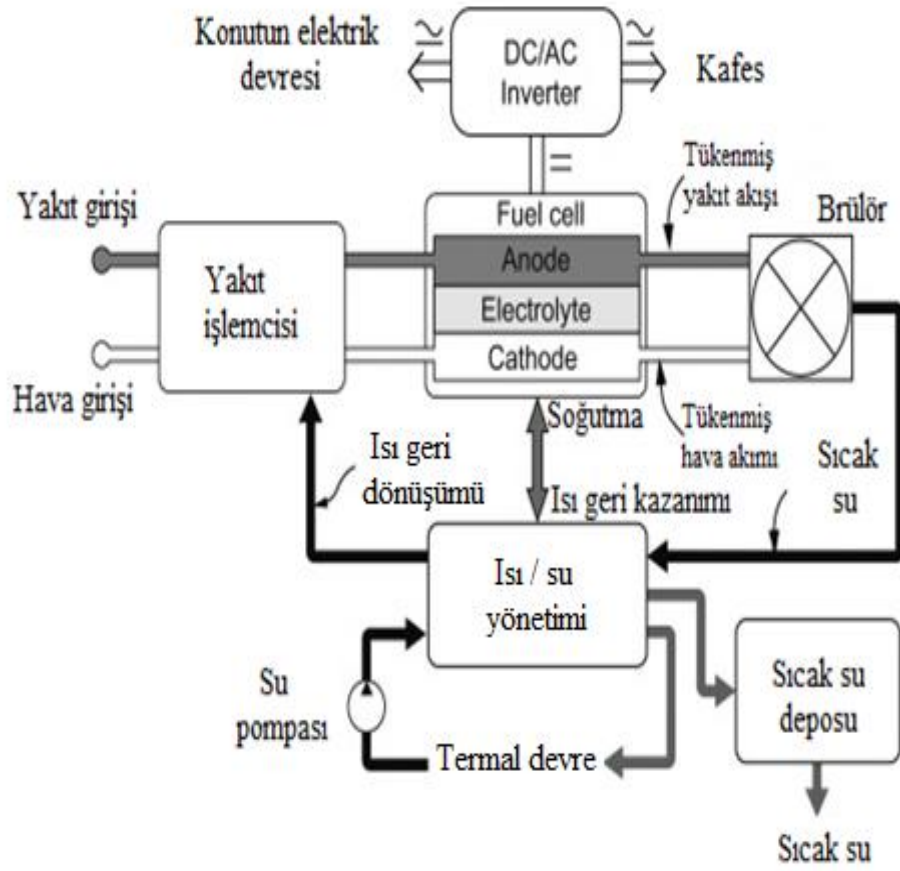
- ✓ Proton değişim membranlı yakıt hücresi
- ✓ Fosforik asit yakıt hücresi
- ✓ Erimiş karbonat yakıt hücresi
- ✓ Katı oksit yakıt hücresi
- ✓ Alkalin yakıt hücresi

Yakıt hücrelerine ait özellikler Tablo 1.1' de verilmiştir.

Tablo 1.1: Yakıt hücrelerinin genel özellikleri [55]

YAKIT HÜCRESİ	Tipik çalışma sıcaklığı (° C)	Tipik Boyut (kW)	Verimlilik
Alkali yakıt hücresi	<100	1–100	> % 60
Proton değişim membranlı yakıt hücresi	<120	1–100	Hidrojen ile % 60
			İyileştirilmiş yakıtla % 40
Fosforik asit yakıt hücresi	150–200	5–400	% 40
Erimiş karbonat yakıt hücresi	600–700	300–3000	% 50
Katı oksit yakıt hücresi	500–1000	1–1000	% 60

Büyük, küçük ve mikro boyuttaki işletmelerde kullanılabilen yakıt pilleri yüksek elektriksel verimlilik, sessiz, çevre dostu, modülerlik, kurulumunun kolaylığı gibi avantajlarının yanı sıra ilk yatırım maliyetinin yüksek olması, toplam verimliliğin az olması, ömürlerinin kısa oluşu gibi sınırlılıkları da vardır [20].

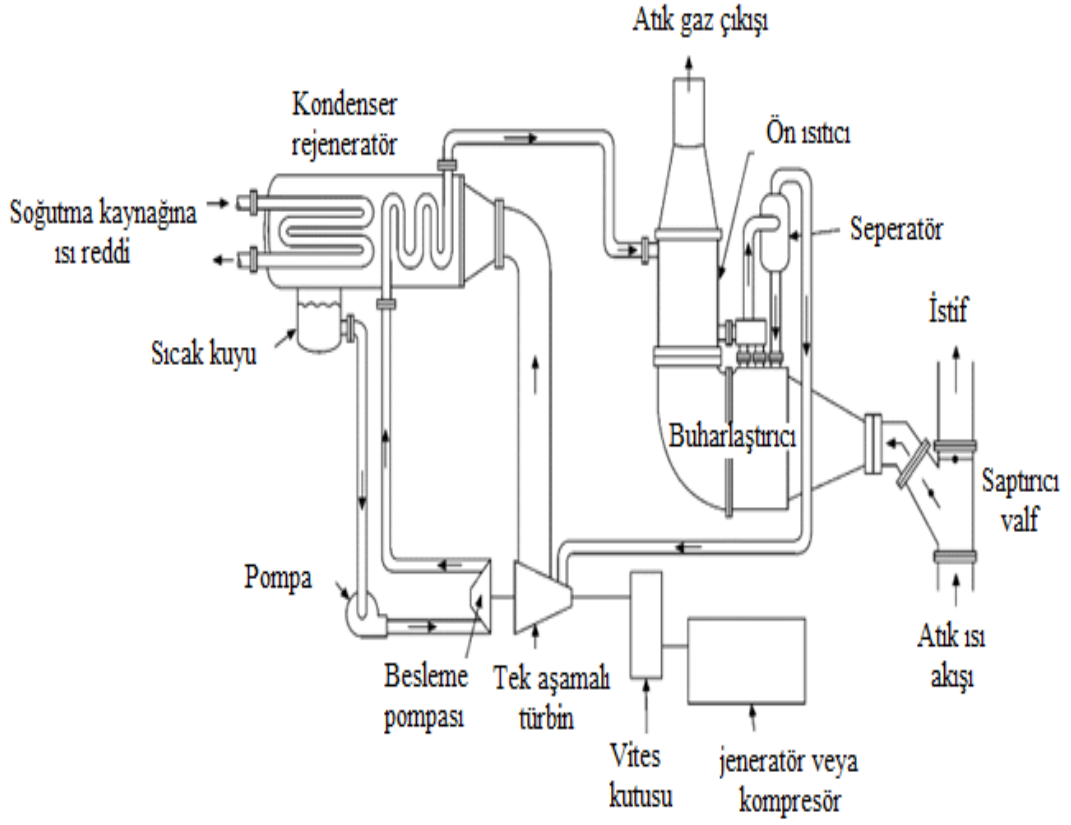


Şekil 1.36: Yakıt hücreli kojenerasyon sistemi [15]

1.5.1.8. Organik Rankine Döngülü Kojenerasyon

Su yerine akışkan olarak organik bir sıvının kullanıldığı rankine çevrimi organik rankine döngüsü olarak bilinir. Isı kaynağının yeterince sıcaklık sağlaması ile akışkan olarak su kullanılması avantajlı bir durumdur. Ancak ısı kaynağının zayıf kaldığı durumlarda yada işletmenin güç aralığının düşük olması durumunda su yerine daha düşük organik bir sıvının kullanılması yararlı olacaktır [56]. Dolayısıyla 400 °C' nin altındaki termal giriş sıcaklığına sahip ve 0,2 - 5 MW güç aralığına sahip küçük ölçekteki santrallerde mikro kojenerasyon uygulamaları için uygun alternatiflerden biridir. Bu alternatif mikro türbinlere göre elektriksel verimin artmasına neden olur [20]. Organik rankine döngülerinde toluen, amonyak, hidrokarbon, butan, silikon yağları vb. kullanılabilir. Çalışma prensibi temelde geleneksel rankine döngüsüyle aynıdır. Asıl amacı yenilenebilir tarzdaki yakıtlardan endüstriyel uygulamalarda düşük

sıcaklıktaki ısılardan düşük kaynama noktasına sahip sıvılar yardımıyla elektrik enerjisi elde etmektir [22].



Şekil 1.37: Organik rankine çevriminin çalışma şeması [56]

Yakıt hücreleri, stirling motorları ve organik rankine çevrimine göre çalışan tahrik kaynakları yeni gelişmekte olan teknolojiler arasında yer alırlar. Bu teknolojilerin daha da gelişmesiyle kojenerasyon uygulamaları daha az enerji ihtiyacı olan yapılarda kullanılmaya başlanmıştır. Kojenerasyon uygulamalarında kullanılan ana taşıyıcılara ait bazı özellikler tablo 1.2 ve tablo 1.3' te verilmiştir.

Tablo 1.2: Bazı ana taşıyıcı tiplerine göre CHP tahmini ömür ve maliyet değerleri [57]

Ana taşıyıcı	Tahmini ömür (yıl)	Maliyet
15 kW' den küçük kapasiteli doğalgaz ile çalışan pistonlu motor	5–6	5000 \$ / kW
110 kW elektrik çıkışlı doğalgaz ile çalışan pistonlu motor	10–20	1300 \$ / kW
100 kW elektrik çıkışlı gaz türbini	10-15	1400 \$ / kW
Buhar türbini	20	> 2000 \$ / kW
Mikrotürbin	10–20	2500 \$ / kW
400 kW elektrik çıkışlı fosforik asit yakıt hücresi	10–20	3000–4000 \$ / kW
Biyokütle kaynaklı	28	5800 \$ / kW

Tablo 1.3: Kojenerasyon sistemleri ana taşıyıcıları için performans özeti [21]

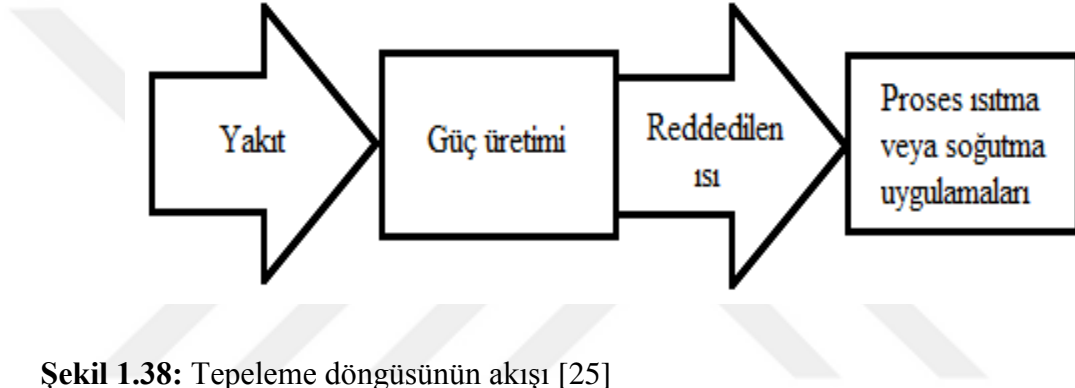
ÖZELLİKLER	Dizel motoru	Doğalgaz motoru	Buhar türbini	Gaz türbini	Mikro türbin	Yakıt pilleri
Elektrik enerjisi verimliliği (%)	30-50	25-45	30-42	25-60	20-30	40-70
Toplam kapasite (MW)	0,05-5	0,05-5	0,05-250	3-200	0,025-0,25	0,2-2
Arazi alanı ayak izi (m ² /kW)	0,02	0,02-0,03	<0,01	0,002-0,06	0,01-0,14	0,02-0,2
İşletme ve bakım maliyeti (USD/kWh)	0,5-0,8	0,7-1,5	0,4	0,2-0,8	0,2-1	0,3-1,5
Başlama zamanı	10 s	10 s	1-24 s	10-60 dk	1 dk	3-48 h
Yakıt basıncı (bar)	0,3	0,1-3	N/A	8-35	3-7	0,1-3
NO _x emisyonları (kg/MWh)	1,4-15	1-13	0,8	0,1-1,8	0,2-1	<0,01
CHP çıkışı (toplam kJ çıkışı/kWh girişi)	3400	1000-5000	N/A	3400-12000	4000-15000	500-3700
Termal yan ürünün sıcaklığı (° C)	80-500	150-260	N/A	260-600	200-350	60-400
Isı kazanımı için kullanımlar						
Sıcak su ısıtma	+	+		+	+	+
Alan ısıtma			+	+		
Merkezi ısıtma	+	+	+	+		
LP buhar	+	+	+	+	+	+
HP buhar			+	+		+

1.5.2. Enerji Sırasına Göre

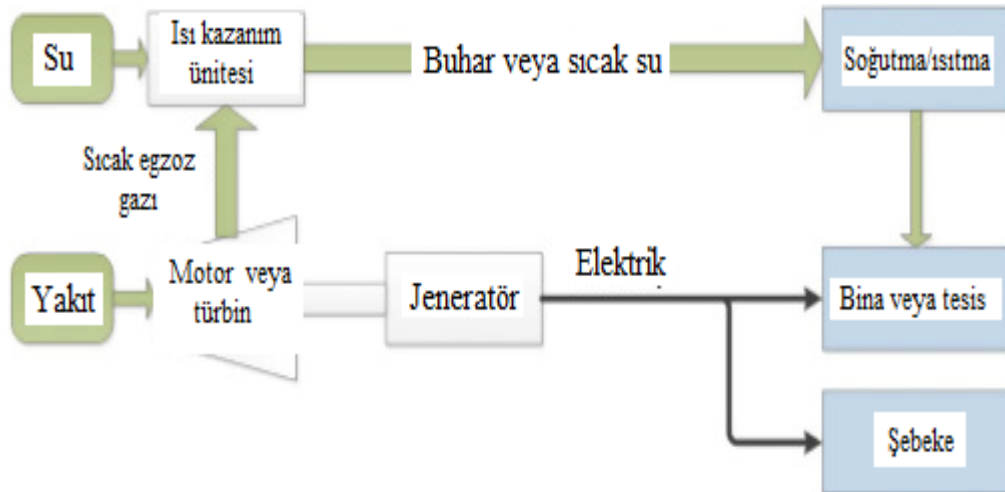
Kojenerasyon sistemleri enerji kullanım önceliğine göre iki grupta incelenir.

1.5.2.1. Tepeleme Döngüsü

Tepeleme döngüsünde yakıttaki enerji, öncelikli olarak güç (elektrik) üretimi için kullanılır. Tesisin ısıl ihtiyaçları için yan ürün olan termal enerji kullanılır. Tepeleme döngüsü yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [25].



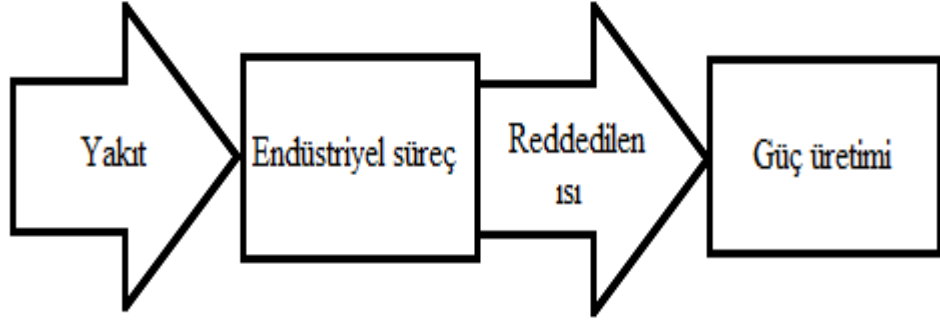
Şekil 1.38: Tepeleme döngüsünün akışı [25]



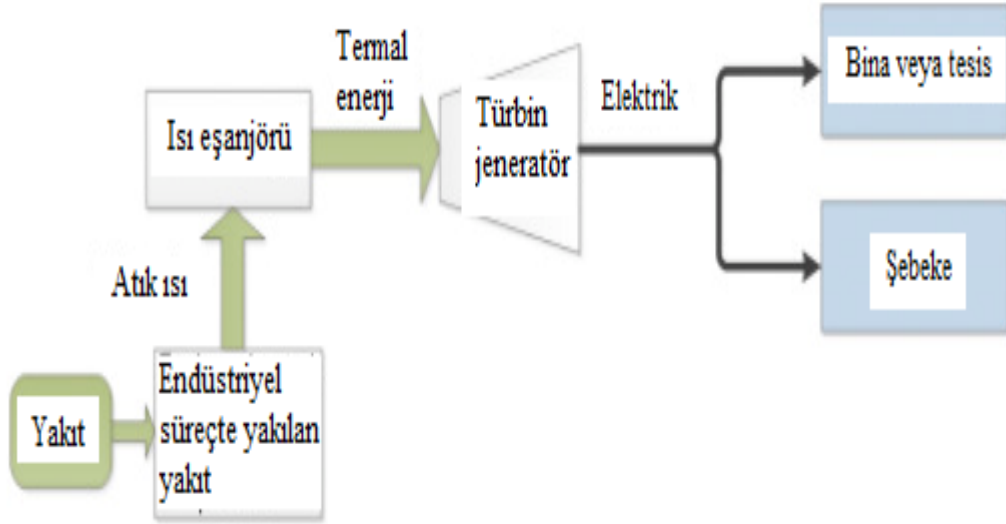
Şekil 1.39: CHP' nin tepeleme döngüsünün şematik gösterimi [50]

1.5.2.2. Dibe Vurma Döngüsü

Dibe vurma döngüsünde ise yakıttaki enerji, öncelikli olarak termal enerji üretimi için kullanılır. Yani birincil ürün termal enerji, atık ısı ise elektrik üretimi için kullanılır. Bu sistemler ıstıyı yüksek sıcaklıkta reddettikleri için çimento, çelik, seramik, petrokimya endüstrisi gibi alanlarda sıklıkla kullanılır [25].



Şekil 1.40: Dibe vurma döngüsünün akışı [25]



Şekil 1.41: CHP' nin dibe vurma döngüsünün şematik gösterimi [50]

1.5.3. Tesis Boyutuna Göre

Talep edilen enerjiye ve uygulamalara bağı olarak kojenerasyon sistemleri büyüklüklerine göre 3'e ayrılır.

1.5.3.1. Büyük Ölçekli Kojenerasyon

Gücü 1,5 MW' tan büyük olan kojenerasyon tesisleridir. Dünyadaki kojenerasyon uygulamalarının yaklaşık % 90' ını oluşturur. Genellikle sanayi sitelerinde ve büyük petrol rafinelerinde görülmektedir. Ana taşıyıcı olarak gaz türbini, buhar türbini veya bazen de kombine çevrim kullanılır. Endüstriyel işlemlerde yüksek buhar ihtiyacı bu sistemlerle karşılanabilir. Pistonlu motorlarda büyük ölçekli tesislerde kullanılabilen diğer alternatiftir. Isı / güç oranının düşük olduğu ve bölgesel ısıtmanın yapıldığı yerlerde pistonlu motorlar kullanılır [17].

1.5.3.2. Küçük Ölçekli Kojenerasyon

Gücü 60 kW ile 1,5 MW arasında değişen kojenerasyon tesisleridir. Ana taşıyıcı olarak genellikle içten yanmalı motorlar kullanılır. Küçük ölçekli gaz türbinleri de ana taşıyıcı olarak kullanılabilirler ancak bunlarda elektriksel verim düşük olur. Küçük ölçekli kojenerasyon sistemleri genellikle paketlenmiş elemanlar (birincil taşıyıcı, jeneratör, atık ısı kazanı, kontrol sistemi, borular vb.) şeklinde tasarlanıp talebe uygun olarak temin edilirler [25].

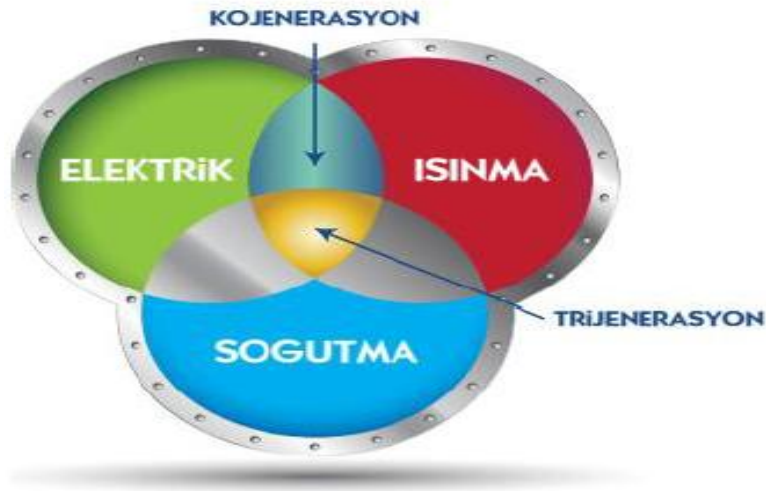
1.5.3.3. Mikro Ölçekli Kojenerasyon

Gücü 60 kW' tan az olan kojenerasyon tesisleridir. İçten yanmalı motorlar, yakıt hücreleri, mikro türbinler, stirling motorları ana taşıyıcı olarak görev yapabilir [25]. Küçük ve mikro ölçekli kojenerasyon sistemleri, birleşik ısı ve güç uygulamalarının en geniş kullanım alanına sahip olmakla beraber teknolojinin de gelişmesiyle ekonomik

iyileşme sağlanmış ve dünya genelinde gitgide yaygınlaşmaktadır. Bina sektöründe (ticari site, konutlar, hastane, avm vb.) rahatlıkla uygulanabilir [22,25].

1.6. Birleşik Soğutma Isıtma ve Güç Teknolojilerine Giriş

Birleşik ısı ve güç teknolojileri yada başka bir deyişle kojenerasyon sistemlerinde elektriksel gücün yanında eş zamanlı olarak üretilen termal enerji konutlara senenin soğuk aylarında faydalı olarak daha çok mevsimsel ihtiyaçlara cevap verir niteliktedir. Gerekli soğutmayı sağlamak için ise kojenerasyon teknolojilerinin ısı çıkışlarına eklenen sistemlerle klima teknolojilerine olan ilgi gittikçe artmaktadır. 1777 yılında absorpsiyonlu soğutma sistemleri keşfedilerek 1850' de sulu amonyak çevrimiyle ilk ticari makine üretilmiştir. 1920' lerde ise var olan su soğutucularında kullanılmak üzere lityum bromür teknolojisi gelişerek gittikçe kojenerasyon uygulamalarını daha kullanılabilir hale gelmesini sağlamıştır [17]. Kojenerasyon uygulamaları güç ve kullanılabilir ısıyı eş zamanlı olarak üretir. Birleşik soğutma ısıtma ve güç sistemleri yada başka bir deyişle trijenerasyon teknolojisi ise bir adım daha ileri giderek enerji santrali tarafından üretilen atık ısı daha fazla kullanılarak soğutma gücü elde edilir [29].

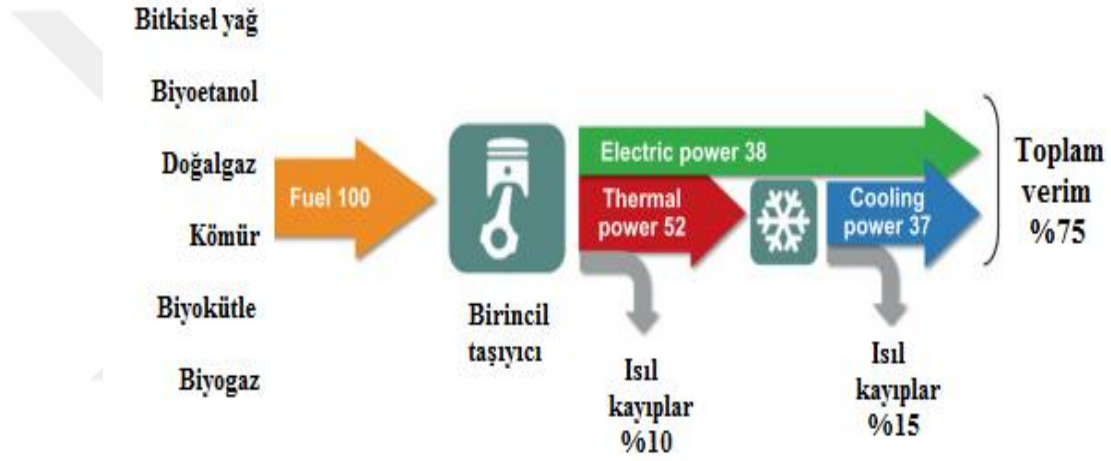


Şekil 1.42: Kojenerasyon ve trijenerasyon ayrımı [58]

1.7. Trijenerasyon Sistemleri

1.7.1. Trijenerasyon Sistemlerinin Tanımı ve Özellikleri

Kojenerasyonun bir uzantısı olarak karşımıza çıkan, aynı anda ısı ve elektrik gücünün üretildiği birleşik ısı ve güç sistemlerine ilaveten enerjiden daha fazla faydalanarak kullanılabilir soğutma da üreten sistemlere "Trijenerasyon" adı verilir. Trijenerasyon kısaca ısı, elektrik ve soğutmanın tek bir süreçte aynı zamanda üretilmesidir [21]. Trijenerasyon literatürde "Kombine Isı ve Güç", "Birleşik Isı ve Güç" veya İngilizce Combined Cooling Heat and Power ifadesinin kısaltılışı olan "CCHP" olarak da bilinir.

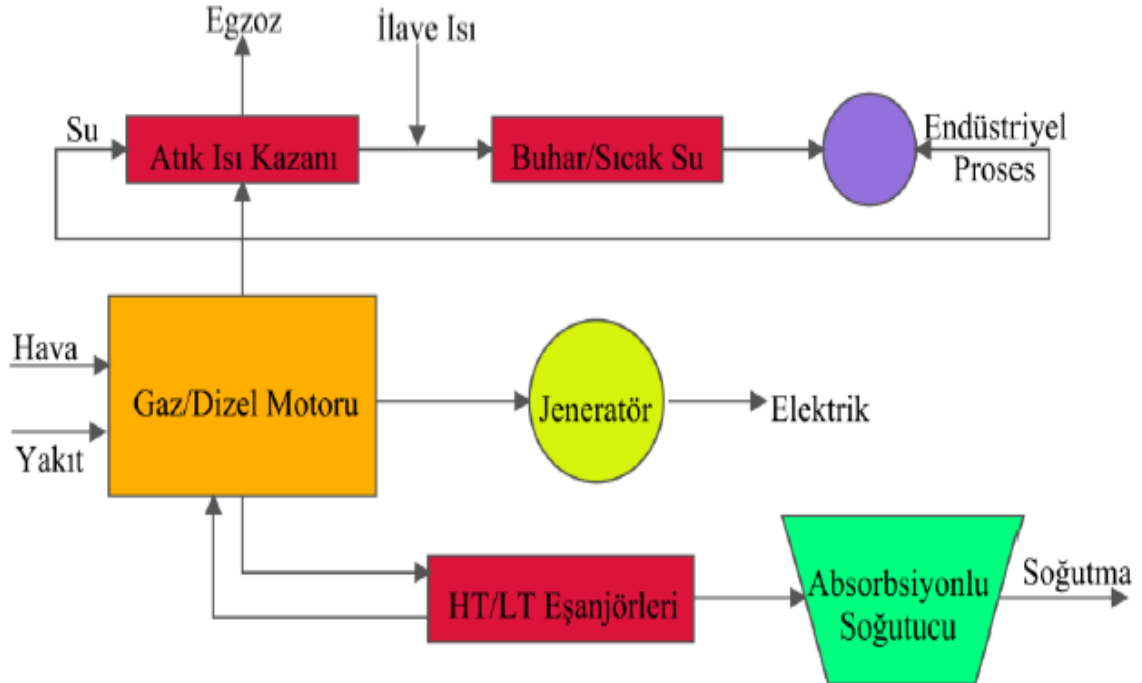


Şekil 1.43: Trijenerasyon ünitesinde enerji akışı [20]

Trijenerasyon sistemleri kullanım amacının uygun olduğu bir tesise / konuta uygulandığı takdirde kojenerasyon sistemlerine göre toplam verim, çevresel ve ekonomik anlamda daha da avantajlı olabilir. Genel olarak trijenerasyon sistemlerinin üstünlükleri aşağıdaki gibi sıralanabilir [22].

- ✓ Atık ısının kullanılmasıyla enerjiden yüksek oranda yararlanma ve yüksek verimlilik
- ✓ Maliyetin kendini kısa zamanda telafi edebilmesi
- ✓ Kirlenici gaz emisyonunu azaltması
- ✓ Enerjinin iletim kaybına uğramaması
- ✓ Yakıt yelpazesinin genişliği

Trijenerasyon sistemlerinin sınıflandırması kojenerasyon sistemlerinde olduğu gibi boyuta göre, uygulamaya göre, birincil taşıyıcıya göre ve enerji sırasına göre sınıflandırılabilir. Boyuta göre mikro (20 kW' a kadar), küçük (20 kW - 1 MW), orta (1 MW - 10 MW) ve büyük (10 MW üzeri) ölçekli gruplara ayrılarak uygulama bazında ise merkezi enerji santralleri ve ticari, kurumsal, konutsal, küçük sistemler olarak sınıflandırılır. Mikro ve küçük kapasiteli sistemlerde ana taşıyıcılar içten yanmalı motor ve mikro türbinlerdir. Merkezi büyük santrallerde ise buhar türbini ve gaz türbini kullanılır. Yüksek verimlilik, düşük emisyon değerlerine sahip olan ve termodinamik çevrime dayanmayan yenilenebilir enerji (biyokütle, rüzgar, güneş vb.), yakıt pilleri, stirling motorları, organik rankine çevrimleri daha geliştirilme aşamasındadır. Şuan içten yanmalı motorlar, buhar ve gaz türbinleri kurulu sistemin çoğunu oluşturmaktadır. Enerji sırasına göre ise tepeleme ve dibe vurma olarak iki grupta incelenebilir. Yakıttaki enerjiden öncelikli olarak elektrik üretimi ve yan ürün termal enerji tepeleme yönteminin amacıdır ve trijenerasyon sistemlerinde en yaygın bu yöntem kullanılır. Dibe vurma döngüsünde ise yakıttaki enerjiden asıl amaç ısı üretimi yan ürün ise elektrik çıktısıdır [29].



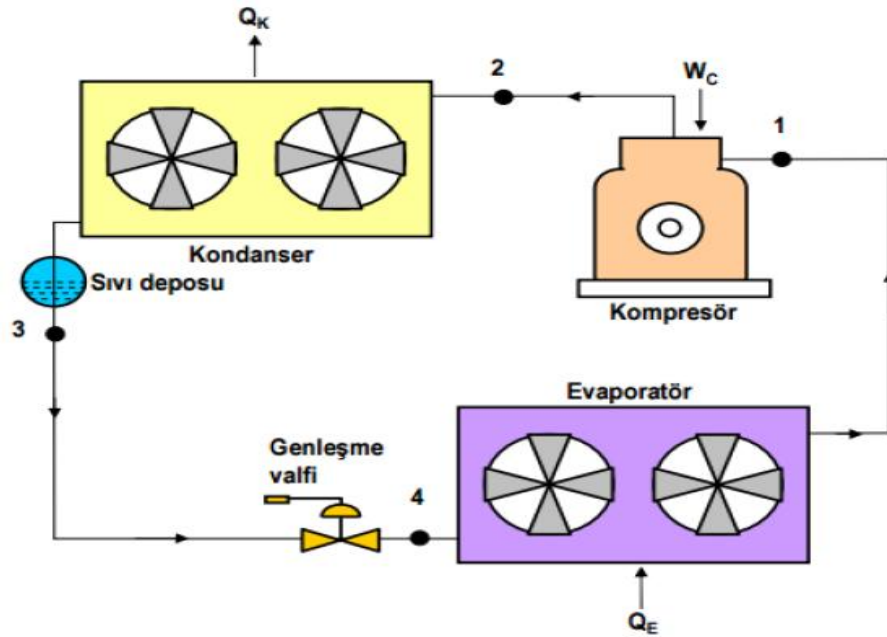
Şekil 1.44: İçten yanmalı motorlu trijenerasyon sistemi şeması [59]

1.7.2. Trijenerasyon Sistemlerinde Soğutma

Düşük sıcaklığa sahip bir bölgeden daha yüksek sıcaklıktaki bölgeye ısı transfer işlemine soğutma adı verilir [60]. Trijenerasyon sistemlerinde kaynağını elektrikten alan kompresörlü yani sıkıştırırmalı soğutma ile kaynağını ısı enerjisinden alan absorpsiyonlu soğutma olmak üzere yaygın olarak 2 çeşit soğutma uygulaması vardır. Absorpsiyonlu soğutma egzoz ısını değerlendirildiğinden verimi termodinamik olarak kompresörlü soğutmaya göre daha fazla olur [8].

1.7.2.1. Kompresörlü Soğutma

Kompresör, yoğuşturucu (kondanser), buharlaştırıcı (evaporatör) ve genişleme valfi (kısılma vanası) gibi temel elemanlardan oluşan ve alçak ve yüksek basınç hattı gibi 2 ana basınç bölgesinden oluşur. Kompresörlü soğutmada soğutucu akışkanın sıcaklığı ve basıncı kompresörde yükseltilerek kondansere giderek burada yoğuşarak ortama ısı verir. Sıcaklığı ve basıncı azalmış bir şekilde evaporatöre girerek burada buharlaşarak soğutulması istenen ortamdaki ısı olarak ortamın soğutulmasını sağlar. Akışkan daha sonra kompresör tarafından emilerek çevrim tamamlanmış olur [61].



Şekil 1.45: Kompresörlü soğutma sistemi [4]

1.7.2.2. Absorbsiyonlu Soğutma

Kompresörlü soğutmada farklı olarak kompresör içermeyen absorpsiyonlu soğutma sistemlerinde bir akışkanın başka bir akışkan içerisinde çözünmesi sağlanarak absorbe ettirilir. Kompresörün yerini pompa, kısılma vanası, ısıtıcı (jeneratör), ısı değiştirici ve ayırıcı alır. Bunlardan başka kompresörlü soğutma sistemlerinde bulunan buharlaştırıcı, yoğuşturucu ve kısılma vanası absorpsiyonlu soğutma sistemlerinde de bulunmaktadır [62]. Absorpsiyonlu soğutma sistemlerinde görev alan elemanlar kısaca aşağıda açıklanmıştır [61].

Soğurucu (absorber): Soğutucu akışkanın üzerine emici (soğurucu, absorblayıcı) akışkanın püskürtülerek çözünmenin sağlandığı ve soğutucu akışkandan ısının çekilerek çözünmenin verimli olmasının sağlandığı kısımdır

Eriyik pompası: Soğurucunun tabanında biriken soğutucu akışkan - emici akışkan karışımını, ısıtıcı bölümünden gelen ısı ile ön ısıtma amacıyla ısı eşanjörüne gönderen elemandır.

Isı eşanjörü: Ön ısıtma amacıyla çözeltilin (soğutucu + emici sıvı) ısıtıldığı bölümdür.

Isıtıcı (jeneratör): Isı eşanjöründen gelen çözeltilin kaynatıldığı ve soğutucu akışkanın buharlaştırılarak ayırıcıya ve kondensere gönderildiği kısımdır.

Ayırıcı: Soğutucu akışkanla emici akışkanın birbirinden ayrılarak soğutkanın kondensere, emici sıvının ise ısıtıcıya geri döndüğü kısımdır.

Kondenser (Yoğuşturucu): Soğutucu akışkan buhar halinde kondensere gelerek gazdan sıvı hale geçerek yoğuştuğu ve ortama ısı verdiği bölümdür.

Genleşme valfi (Kısılma vanası): Birisi kondenserden gelen soğutkanın basıncını buharlaştırıcı basıncına düşürmek diğeri ise çözeltilin basıncını düşürerek soğurucuya iletmek görevi için 2 adet bulunan elemandır.

Evaporatör (Buharlaştırıcı): Sıcaklığı ve basıncı azalmış olan soğutucu akışkanın soğutulması istenen ortamdan ısı alarak buharlaşıp gaz olarak tekrardan çevrimi tamamlamak üzere soğurucuya iletildiği bölümdür.

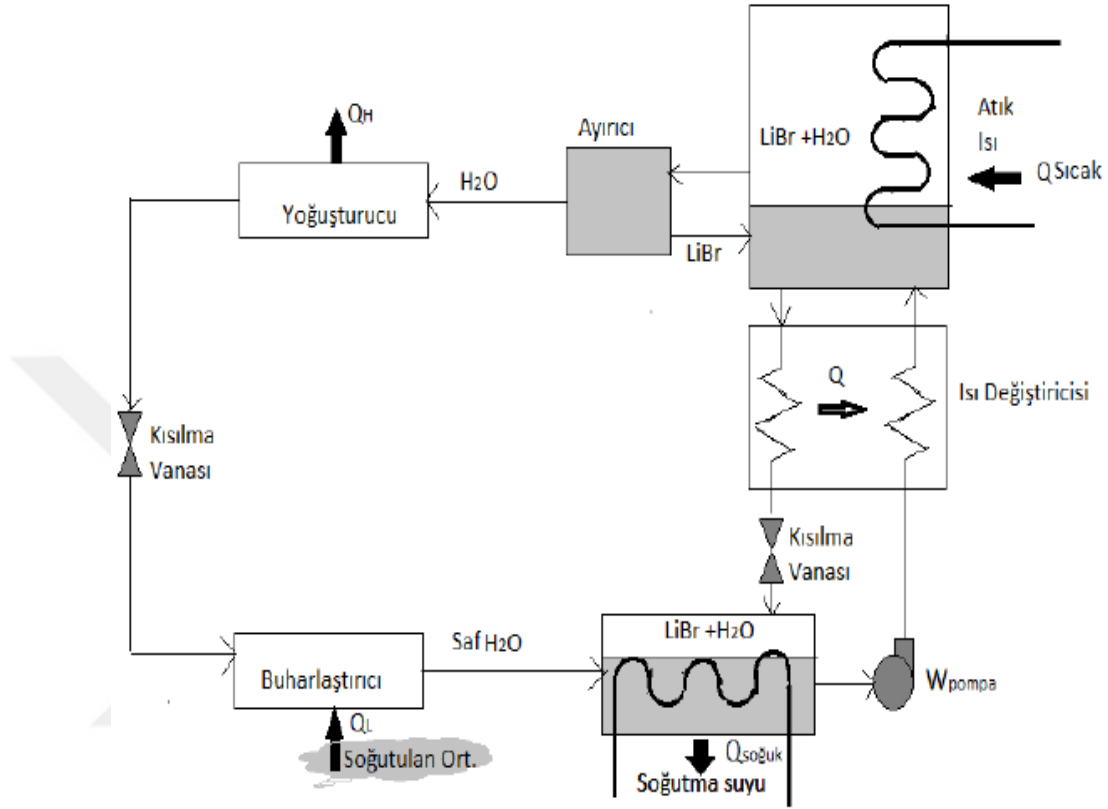
Absorbsiyonlu soğutma sistemlerinde soğutucu ve emici görevini üstlenen iki akışkan çiftinden oluşan karışımlar kullanılır. Bunlar genellikle LiBr + H₂O (lityum bromür emici, su ise soğutucu akışkan), NH₃ + H₂O (su emici, amonyak ise soğutucu akışkan) karışımları ve LiCl₂ + H₂O (lityum klorür emici, su ise soğutucu akışkan) olabilir. Soğurmalı soğutma olarak bilinen absorbsiyonlu soğutma sistemlerinde soğutucu akışkanın başka bir akışkan içinde emilmesi yada soğurulması gerçekleşir. Evaporatörden çıkan buhar halindeki amonyak soğurucu içerisinde su tarafından soğurulmasıyla (bu işlem yapılırken bir miktar ısı çekilerek çözünen NH₃ miktarının artması sağlanır) oluşan solüsyon ısıtıcıya pompalanarak dış kaynaklı ısı yardımıyla buharlaştırılır ve ayırıcıda su amonyaktan ayrılarak ısıtıcıya geri döner. Sudan ayrılmış olan buhar halindeki amonyak kondenserde yoğunlaşarak sıcaklık ve basıncı düşer. Genleşme valfinden ise basıncı düşürülüp buharlaştırıcı basıncına gelerek evaporatörde buharlaşarak soğutulan ortamdaki ısıyı çeker ve döngü tamamlanmış olur [60].

Absorbsiyonlu soğutma sistemleri genel olarak tek kademeli ve çift kademeli olarak sınıflandırılabilir. Tek kademeli absorbsiyonlu sistemler; 0,8'e denk COP değeri, yaklaşık 158 kW ile 4853 kW arası boyut, kızgın su (80 °C - 130 °C), en fazla 1 bar olan buhar kaynaklarını kullanabilme özellikleriyle trijenerasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Bu sistemle 5 °C'lik hava ortamı sağlanabilir. Çift kademeli sistemler ise 1,2'ye denk COP değeri, 320 kW ile 5280 kW arası boyut, enerji kaynağı olarak ise yüksek basınçlı buharla çalışabilme özellikleriyle daha çok buhar türbinli trijenerasyon sistemlerinde kullanılmaktadır [22]. Bu soğutma sistemlerinde 2 ısı eşanjörü ve 2 tane ısıtıcı (jeneratör) kullanılır. Yüksek basınç (1. jeneratör çalıştırılır) , orta basınç (2. jeneratör ve yoğunlaştırıcı çalıştırılır) ve düşük basınç (buharlaştırıcı ve soğurucu çalıştırılır) olmak üzere sistem 3 farklı basınç kademesinde çalıştırılır [27].

Lityum Bromür-Su Absorbsiyonlu Soğutma Sistemi

Soğutucu akışkan olarak suyun, absorblayıcı olarak ise lityum bromürün kullanıldığı soğutma sistemleridir. 4 °C sıcaklığın altında çalışmamasının yanında suyun avantajlı özellikleri (ekonomik olması, buharlaşma ısısının yüksek olması, kolay bulunabilmesi, bol miktarda olması, ısıtıcıda lityum bromürden kolaylıkla ayrılabilmesi vb) ve lityum

bromürün uçucu özelliğinin olmaması, $H_2O + LiBr$ çiftinin COP değerinin (performans etkinlik katsayısının) $NH_3 + H_2O$ çiftinden fazla olması gibi durumlardan ötürü son yıllarda iklimlendirme çalışmalarında sıklıkla tercih edilmektedir [61].



Şekil 1.46: Tek aşamalı LiBr-H₂O absorpsiyonlu soğutma sistemi [63]

1.7.3. Trijenerasyon Sistemlerinin Çalışma Prensibi

Sistemde var olan ana taşıyıcıya göre farklı şekillerde kullanılan yakıt enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülerek jeneratör sayesinde elektrik üretilir. Taşıyıcının buhar türbini olması durumunda yakıt yakılarak elde edilen buharın türbin milini hareketiyle, gaz türbini olması durumunda yakılan yakıttan elde edilen gazın türbin milini döndürmesiyle, gaz motoru olmasında ise silindir odada yanan yakıtın oluşturduğu gaz ile oluşan basıncın pistonu hareket kazandırmasıyla elektrik enerjisi üretilir. Bu sistemlerin tamamında yakıtın yanmasıyla oluşan ve geleneksel sistemde kullanılmayan ısı geri kazandırılmak üzere atık ısı kazanına iletilerek burada buhar üretimi, kızgın su, ortam ısıtma vb.

işlemlerle tekrardan kullanılabilir duruma getirilir. Buraya kadar ki olay kojenerasyon sistemleriyle aynıdır. Isı geri kazanım ünitesinde kullanılmayan egzoz ısısı şeklinde dışarıya verilecek atık ısı uygun bir soğutma sistem sayesinde kullanılarak soğutma gücü elde edilir ve başlangıçtaki yakıtın büyük bir kısmı kullanılabilir enerjiye dönüştürülür.



2. LİTERATÜR TARAMASI

Güney İtalya coğrafi bölgesinde bulunan Puglia'da ki Acquaviva delle Fonti şehrindeki 600 yataklı F.Muilli hastanesine kurulu olan trijenerasyon sisteminin, akademik çevrede yüksek doğruluk, geçerlilik ve güvenilirliğiyle öne çıkan TRNSYS 17 ortamında modellenen dinamik simülasyonu, enerji ve ekonomik verimi detaylı bir şekilde incelenmiş ve sistemin optimal çalışma stratejisi değerlendirilmiştir. Sistem içten yanmalı, doğal gaz ile tahrik edilen motorun tek aşamalı LiBr-H₂ ile desteklenen absorpsiyonlu soğutucuyla birleştirilmesiyle oluşmuştur. Çalışmada sunulan yaklaşımın günlük, haftalık ve yıllık olmak üzere sonuçları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Sonuçta sistemin boyutlandırılmasının hastanenin enerji ihtiyacına göre yapılmasından ve bazı haklı nedenlerden dolayı (fazla elektrik üretimi, kısmi yük sorunu) hastanenin ısı ihtiyacının sadece % 41'lik kısmının karşılandığı görülmüştür. Ayrıca % 9 gibi düşük bir birincil enerji tasarrufu olmuştur. Ancak bu olumsuzluğa rağmen hastanenin elektrik ihtiyacının % 42' lik elektriksel verimle % 92' lik kısmının karşılanması, sistem geri ödeme süresinin 1,5 yıl olması ve 3,88' lik karlılık endeksi önerilen yaklaşımın ekonomik olarak başarısını gösterir [64].

Sürekli bir şekilde ısı,elektrik ve soğutma ihtiyacı bulunan binalarda, trijenerasyon sistemi gelecek için umut vaat etmektedir. Hastaneler bu binalara örnek olarak verilebilir. Enerji ihtiyacının süreklilik arz etmediği durumlarda ise birleşik ısı ve güç sistemlerinin karlı olmadığı da göz önünde bulundurularak sistemin detaylı bir maliyet analizi ve ihtimal dahilinde yönetim planlarını gözden geçirmek önem arz etmektedir. Yıl boyunca elektrik ihtiyacı göz önüne alınarak 2,9 ile 4,2 MW arasında değişen güce ihtiyacı olan Slovenya' nın en büyük hastanesine kurulabilecek olan kojenerasyon sistemi en yüksek elektrik talebine göre 4,2 MW gücünde gaz türbinli olacak şekilde seçilmiştir. Sistemin çalışmasının tam olarak optimize edilmediği ancak sistemin ekonomik ve soğutma üretim optimizasyonuna yoğunlaşılacak çalışmada trijenerasyon sisteminin karlı olabileceği görülmüştür. Sistemin ısıtma taleplerine tam olarak cevap verebilmesi için gaz kazanı ve soğuk depolama ilavesinin olumlu olacağı belirtilmiştir. Soğuk hava depolama sisteminin olmadığı durumlarda geri ödeme süresinin 6,71 yıl ve 1,07' lik karlılık endeksine karşı soğuk hava depolu sistemin 5,86 yıllık geri ödeme süresi ve 1,09' luk karlılık endeksiyle soğuk hava ünitesinin eklenmesi ek maliyet

getirmesine karşın uzun vadede daha ekonomik olacağı belirtilmiştir. Gaz türbin tahrikli trijenerasyon sistemlerinde soğutma enerjisinin karşılanmasında ekonomik olarak en optimum çözümün soğuk depolamalı absorpsiyonlu ve sıkıştırılmalı soğutucu kullanılması durumunda gerçekleşeceği gözlemlenmiştir [65].

İtalya'daki 147 yataklı bünyesinde 35 klinik barındıran orta büyüklükteki bir hastaneye trijenerasyon sisteminin kurulmasından önce gerçek performansını öngörmek amacıyla dinamik simülasyon modeliyle sistemin detaylı sayısal analizini ve daha verimli bir ekonomik planlama için tüm koşullarında optimize edilerek birleşik ısı güç ve soğutma (CCHP) sisteminin performansını en üst seviyeye çıkarmak için yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Sistemde içten yanmalı pistonlu ve doğal gaz ile çalışan motor ile tek aşamalı LiBr-H₂O ile desteklenen ve çeşitli yardımcı elemanları barındıran CCHP tesisi, SketchUp'ta gerçekleştirilen ve TRNBUILD ile karakterize edilen hastane binasının tanıtıldığı TRNSYS ortamında dinamik olarak modellenmiştir. Bu çalışmada, TLT, MPTLT ve ELT olmak üzere 3 işletim stratejisi analiz edilerek sonuçlar farklı zaman dilimlerinde sunulmuştur. 3 stratejiden hem ekonomik hem de enerjik olarak en iyi stratejinin geri ödeme süresinin 4 yıl olarak bulunduğu ELT stratejisi, en çevreci yaklaşımın ise % 24' lük birincil enerji tasarrufuyla TLT stratejisinin olduğu belirtile de her üç yaklaşımında konu olan tesise enerjik, çevresel ve ekonomik fayda sağlayacağı açıklanmıştır [66].

Farklı enerji üretim mekanizmalarının karşılaştırılmasında enerji kullanım faktörü (EUF), ekserji analizi ve birincil enerji tasarrufu (PES) gibi metotlar kullanılabilir. Brezilya'nın güneydoğu bölgesinde bulunan 403 yataklı ve 63.000 m² ' lik alana sahip orta büyüklükteki Brezilya hastanesine COGMCI (Fortran mühendislik programları ve bir Delphi arayüzünden oluşan yazılım) yazılımı kullanılarak geliştirilen ITS simülasyonu, kurulacak olan gaz motorlu trijenerasyon sisteminin performansı ortaya konulmaya çalışılmıştır. Günlük, haftalık, mevsimsel olarak değişen enerji taleplerinden ötürü maksimum ve minimum ekserji verimleri, enerji kullanım faktörü ve birincil enerji tasarrufu verileri hesaplanmıştır. Yıllık ortalama olarak % 39,05' lik ekserji verimi, % 26,6' lük birincil enerji tasarrufu (PES) ve % 69,3' lük enerji kullanım faktörü (EUF) gibi sayısal verilerle sunulmuş olan yaklaşımın elektrik üretimi yapan termal santrale çok büyük rakip olacağı açıklanmıştır. Bu kıyaslamada birincil enerji

tasarrufu (PES) analizi etkin rol oynar. Bu rapora göre trijenerasyon sisteminin var olan teknolojiden daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir [67].

Sağlık binaları, enerji tüketimin yoğun olduğu binaların başında gelir. Bu yüzden sağlık binalarının enerjiyi etkili olarak kullanmaları için bazı alternatif çalışmalara yönelmeleri gerekmektedir. Bu yönelmeler enerjinin planlaması, enerjinin verimliliği, yenilenebilir enerji kaynakların kullanımı ve enerjinin yönetimi gibi konulara odaklanmalıdır. Çalışmada sağlık binalarının en az maliyetli ve en yüksek verimli olması gerektiğinin altını çizen araştırmanın bir hayli fazla olduğu konuyla ilgili 2006 - 2018 yılları arasında yapılan ve güvenilir bir veri tabanından edinilen 176 makale analiz edildiğinde 83 gibi çoğunluktaki makale ile, yüksek ekonomik verimliliğe sahip ve atık ısı miktarını en aza indirmeye çalışan trijenerasyon ve kojenerasyon uygulamalarının büyük tesisler için üzerinde en çok durulan alternatif çözüm olduğu sonucu çıkmıştır. Bu birleşik ısı ve güç uygulamalarının da genellikle 500 ve üzeri yatak sayısına sahip hastanelere uygulandığı veya uygulanacağı; daha küçük sağlık tesisleri için ise yenilenebilir enerji uygulamalarının (fotovoltaik sistemler, biyokütle enerjisi, güneş enerjisi gibi) uygulandığı veya uygulanacağını olması gerektiği belirtilmiştir [68].

Sağlık hizmetlerinin devamlılığını sağlamak için çeşitli enerji talepleri olan hastanelerin enerji ihtiyacının sürekli, bu enerjinin hem en ekonomik hem de en verimli olması istenmektedir. Polonya'nın güney batısındaki aynı inşaat planına göre inşa edilen hastanelerden, 68.200 m² alana kurulu 680 yataklı hastane örneklem olarak seçilerek enerji verimliliği iyileştirme adına 4 farklı yöntem sunularak her bir yöntemin ısı ve elektrik talebinin kapsamı yüzdelik olarak verilerek bu değerlere karşılık gelen ısı ve elektriksel verimler sunulmuştur. Yapılan analizler sonucunda gaz motoruyla tahrik edilen trijenerasyon sistemiyle ısı ve soğutucu güç üretimi, ısı pompası kullanımı, fotovoltaik tesisat kullanımının enerji maliyetlerini yaklaşık olarak % 31 oranında azalttığı görülmüştür. Ayrıca bu yaklaşımın kentleşmenin yoğun olduğu yerlere kurulan hastanelerin çevreye vermiş oldukları zararı da azaltması da önemli bir konudur [69].

Hastanelere kurulacak olan trijenerasyon sistemi, binanın enerji ihtiyaçlarını minimum ekonomikle karşılama amacıyla elektrik şebekesinden ayrı veya şebekeye bağlantılı tasarlanabilir. Değişken enerji talepleri doğrultusunda şebekeye bağlantılı tasarlanması

yararlı olacaktır. Karma tamsayı doğrusal programlamaya dayalı optimizasyon modeli oluşturularak hastanelerdeki trijenerasyon sisteminin yapısı ve işleyişi üzerindeki en etkili faktörleri belirlemek için gerçekleştirilen duyarlılık analizlerinde teknik ve ekonomik duyarlılık analizleri yapılmıştır. Teknik duyarlılık analizlerinde enerji taleplerinin değişimi dikkate alınarak -% 15 ve % 5 arasında gerçekleşebilecek değişimlere duyarlı olabileceği önerilen sistemin olumlu bir çizgide olduğunu belirtir. Ekonomik duyarlılık analizlerinde ise önerilen sistem yine olumlu bir sonuç vermiştir [70].

Hastanelere trijenerasyon sistemlerinin tasarlanmasında sistemin ekonomik maliyetini ve çevreye etkilerini bir arada içeren optimal yaklaşımlar yapılması son derece önem arz etmektedir. Çevreye verilen zararın azaltılması yıllık maliyette artışa sebep olmaktadır [71].

Trijenerasyon sistemlerinin tasarımı birden fazla değişkene göre belirlenebilen çok amaçlı optimizasyon sorunudur. Bu değişkenler enerjik, maliyet, çevresel, fiziksel yapı ve kapasite olabilir. Bu bağlamda 300 yataklı bir hastaneye doğal gaz ile çalışan içten yanmalı gaz motorlu yapılması planlanan trijenerasyon ve kojenerasyon sistemleri genetik algoritma yaklaşımıyla geleneksel enerji üretim mekanizmalarından hem daha yüksek enerjik verime sahip hem kirletici gaz emisyonunu azaltarak daha çevreci hem de bazı teşviklerle daha ekonomik olabileceği belirtilmiştir [72].

Doğal gaz yakıtıyla çalışan gaz motorlu kojenerasyon sistemleri atık ısıyı kullanılabilir hale getirerek ucuz yollu elektrik ve ısı enerjisi üretir. Fosil yakıtların tükenmesi ve pahalı olması; Türkiye'de doğal gazın gittikçe yaygınlaşması tek bir sistemden ısı ve elektrik üreten kojenerasyon; ısı ve elektrige ek olarak soğutma enerjisini de sunan trijenerasyon sistemleri yüksek enerji verimlilikleri nedeniyle hastaneler için cazip hale gelmektedirler. Adana'da orta büyüklükteki bir üniversite hastanesine uygulanması planlanan kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin tasarımında yeni bir metodoloji önerilmiştir. Bu yeni yaklaşım seçilen birimin enerji taleplerine göre belirlenen optimizasyondur. Sonuçta elde edilen verilere göre % 19,66'lık enerji tasarrufu ve 1,35 yıllık geri ödeme süresiyle kojenerasyon; % 19,52'lik enerji tasarrufu ve 1,94 yıllık geri

ödeme süresiyle trijenerasyon sistemleri gelecek için avantajlı alternatifler arasında sayılabilir [73].

Çevresel, ekonomik ve enerjik gibi alanlarda değişik performans sergileyen enerji üretim sistemlerinin çokluğu hizmet binalarında enerji işletim modellemelerine olan talebin artmasına neden olmuştur. Bu optimizasyon yöntemi, yeni ve nispeten hızlı olan karma tamsayı doğrusal programlama kullanılarak oluşturulmuştur. Bu optimizasyon yöntemi İspanya'nın Zaragoza şehrinde bulunan 500 yataklı orta büyüklükteki bir hastaneye uygulanacak olan trijenerasyon sisteminin vaka çalışmasında kullanılmıştır. İncelenen tüm yaklaşımlarda enerji verimliliği göze çarpmış, 3 yıldan daha az bir geri ödeme süresi ve geleneksel enerji üretim sistemlerine göre yıllık %90' lık bir enerji maliyetlerinde azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca analiz edilen bütün yaklaşımlarda gaz motorlu kojenerasyon sistemlerinin gaz türbinli kojenerasyon sistemlerinden daha ekonomik olduğu; trijenerasyon sistemlerinin kojenerasyon sistemlerinden, kojenerasyon tesislerinde geleneksel sistemlerden daha avantajlı olduğu ve tüm yaklaşımlarda optimal çözümler arasında aşırı bir farklılık gözlenmemiştir [74].

Geleneksel sistemlere nazaran daha yüksek bir verimlilikle karşımıza çıkmakta olan trijenerasyon sistemleri birincil enerji talebini azaltarak çevresel açıdan yararlı olabilmektedir. Bu sistemler için tasarımsal birden fazla seçenek olduğu için trijenerasyon sistemlerine ait yaşam döngüsü değerlendirme olarak belirtilen LCA metodundan çevresel performans analizinde yararlanılabilir. Bu metod; Hedef ve kapsam tanımı, envanter analizi, etki değerlendirmesi ve yorumlama olmak üzere 4 temel aşamadan ibrettir. Hem teknik hem de yönetsel olarak farklılıklar içeren 6 tanesi bilimsel makale olmak üzere toplam 18 tane LCA üzerine incelenen çalışmalara bakıldığında coğrafi anlamda araştırmaların % 83' ü Akdeniz bölgesine odaklandığı görülmüştür. Trijenerasyon sistemlerinin yaşam döngüsünde ve çevresel performansında coğrafi konumun büyük bir etkisi vardır. Diğer taraftan soğutma gücü ihtiyacının fazla olduğu zamanlarda bu talebi karşılamak için mekanik bir soğutucuyu içeren absorpsiyonlu soğutucu olması gerektiği çalışmaların %77' lik bölümünü oluşturduğu ve vaka çalışmalarının % 61' lik kısmının ise yakıt tahriki olarak doğalgaz olduğu görülmüştür. İncelenen çalışmalara çevresel anlamda bakıldığında ise kullanılan yakıt çeşidinden bağımsız olarak trijenerasyon sistemlerinin geleneksel sistemlere

nazaran daha çevreci olduğu belirtilmiştir. Ancak çevresel etkiler konusunda sadece karbondioksit (CO_2) değil diğer sera gazlarını da (örneğin CH_4 , N_2O) hesaba katılarak incelemelerde bulunulması önerilmiştir [75].

Aynı anda mekanik ve ısı formlarındaki enerjinin sürekli kullanıldığı hastanelerde birleşik ısı, güç ve soğutma sistemleri bu eş zamanlılık için oldukça avantajlıdır. Toplam yüzey alanı $93.968 m^2$ olan 6 birleşik binadan oluşan 714 yataklı İtalya'nın kuzeyindeki Parma hastanesine TRNSYS yazılımıyla desteklenen trijenerasyon sisteminin entegrasyonunun fizibilite çalışmasında pistonlu doğal gaz motoruyla tahrik edilen kojenerasyon ünitesine tek aşamalı absorpsiyonlu soğutucu ve elektrikle çalışan sıkıştırılmalı soğutucu seçeneklerinden absorpsiyonlu soğutuculu birimin meydana gelen ısıyı daha fazla kullanabilmesinden dolayı daha avantajlı olabileceği açıklanmıştır. Absorpsiyonlu soğutuculu kojenerasyon birimi trijenerasyon sistemine işaret etmektedir. Ayrıca birincil enerji tasarrufu (PES) endeksinin kojenerasyon sisteminde motor boyutunu belirlemede yetersiz olabileceği belirtilerek termodinamiğin ikinci yasasının bu boyut belirlemede daha etkin olabileceği açıklanmıştır. Optimal durumda ekonomik olarak trijenerasyon (CHCP) sisteminin, 15 ay olarak hesaplanan geri ödeme süresini ve ısının kullanılma miktarının fazla olması ilerde kojenerasyon sistemine göre ekonomik anlamda daha ilgi çekici olabileceği vurgulanmıştır [76].

Birleşik ısı, güç ve soğutma sistemleri son yıllarda enerji tüketimini azaltarak enerji verimi artırma ve çevresel kirliliği azaltma yöntemleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sistemleri boyutsal olarak küçülterek genel verimliliği arttırmak ilgi odağı olmuştur. Genel anlamda bakıldığında birleşik ısı, güç ve soğutma sistemlerinde konut uygulamaları için taşıyıcı seçiminin ve boyutlandırılmasının verimlilik konusunda çok önemli olduğu belirtilerek gelecekte yapılar için daha da popüler olabileceği açıklanmıştır [77].

Trijenerasyon sistemleri giderek daha kompleks hale dönüştüğünden tesislere uygulanması planlanan sistemin boyutlandırılması ve planlanmasının optimal çalışmaları önemli bir konudur. Çin'in Chongqing şehrindeki bir hastaneye yapılması planlanan trijenerasyon sisteminin stokastik seçim algoritması ve genetik algoritma yaklaşımlarıyla yapılabilir olmasının karşılaştırıldığı çalışmada her iki seçiminde

ekonomik ve çevresel amaca hizmet ettiği ancak stokastik çözümün daha güvenilir ve kolay olduğu bulunmuştur [78].

Birleşik soğutma, ısıtma ve güç (CCHP) sistemleriyle ilgili enerjik ve ekserjik analizler, sistem optimizasyonu, performans artırma çalışmaları ve CCHP sistemlerinin iyileştirilmesi ve analizi için kullanılan yöntemler hakkında araştırmacılar, tasarımcılar, mühendisler vb. çevreye rehberlik sağlaması ve bilgi sahibi olabilmesi için 170'den fazla makalenin incelendiği ve analiz edildiği çalışmada CCHP sistemlerinin ekonomik, enerjik ve çevresel anlamda yararlı olabileceği ve olduğu çoğu makalede açıklanmıştır. Bu nedenle genel işletme maliyetlerini, sera gazları salınımını ve birincil enerji kullanımını azaltan optimizasyon çalışmalarıyla sistemin veriminde ve kullanılabilirliğinde iyileşme sağlanacağı da ifade edilmiştir [79].

Kojenerasyon sistemleri eş zamanlı güç ve ısı talebi olan tesisler için oldukça uygun bir yöntemdir. Ana ihtiyaçları güç, ısı ve buhar olan hastane ve fabrika için araştırma yapılmıştır. Kıvılcım ateşlemeli motorla tahrik edilen kojenerasyon sistemi banliyö hastanesine ve doğal gaz ile çalışan gaz motorlu kojenerasyon sistemi de şekerleme fabrikasına yapılmasının tasarlanıp planlandığı çalışmada enerji ihtiyaçlarının ideal şekilde belirlenip buna göre tasarlanmasının kritik bir nokta olduğunu ve sistemin hem hastane hem de fabrika için özellikle de uzun vade de avantajlı olabileceği belirtilmiştir [80].

Hastaneler, yıl boyunca yüksek enerji yük talepleri nedeniyle termal ve elektriksel ihtiyaçların tek aşamada üretilmesi prensibine dayanan ve verimli olabilen kombine ısı ve güç sistemleri için uygun yapıların başında gelir. Yunanistan'ın Piraesus şehrinde bulunmakta olan "Tzaneio" adlı hastaneye uygulanması planlanan kojenerasyon sistemini enerji yüküne göre belirleyerek bu hastaneye birleşik ısı ve güç sistemlerinin uygun olup olmadığını karar vermek için yapılan araştırmada enerji tüketimi, enerji tüketimi maliyeti ve çalışma saatlerine göre farklı güçteki kojenerasyon ünitelerinin kurulumunu öneren alternatif enerji senaryoları önerilmiştir. Sistemin ekonomikliği, enerjik olması ve sera gazı emisyon tasarrufu oranı gibi etkenlere dayalı olarak bir değerlendirme yapılmış ve en uygun ünitenin esneklik ve güvenilirliğinden dolayı içten yanmalı çift gaz motorlu olarak seçilmesi ve bu motorların 8.000 yıl /saat ve 5.000

yıl /saat olarak çalıştırılmasının ekonomik olarak en iyi senaryo olduğu belirtilmiştir. Bu senaryoda Fayda / Maliyet oranının 1'den büyük olması, 20 yıllık bir yaşam döngüsü için iç getiri oranının %19 olması, yıllık toplam enerji maliyetinin % 32,4 azaltılması, birincil enerji tüketiminin %28,3 oranında azalması ve kirletici maddelerin salınımında düşüş yaşanması görülen avantajlı sonuçlar arasında yer alarak sistemin başarısını ortaya koymaktadır [81].

Brezilya'nın Campinas üniversitesi bünyesinde yer alan 60.000 m² alan üzerine kurulu 400 odalı "Barao Geraldo" klinik hastanesinin enerji ihtiyacının içten yanmalı gaz motorla tahrik edilecek olan kojenerasyon tesisiyle karşılanması için ekolojik verimliliğinde değerlendirildiği, geliştirilen ve önerilen termoeconomik optimizasyon yöntemiyle artık ısı kazanımı için alternatif 4 farklı senaryo ekonomik ve enerjik olarak analiz edilmiştir. 4 senaryo içerisinde 3 tanesi kojenerasyonu 1 tanesi ise trijenerasyonu belirtmektedir. Çünkü 1, 2 ve 3 numaralı senaryolar sırasıyla mutfak ve çamaşırhane; sadece mutfak ve sadece çamaşırhanenin ihtiyaçları için egzoz gazlarından kalan ısıyı kullanarak buhar eldesini; son senaryo ise tek aşamalı absorpsiyonlu soğutucu ve çift aşamalı absorpsiyonlu soğutucu yardımıyla 2 farklı alt senaryo ile soğuk su üretmek için atık ısıyı kullanır. Ekolojik olarak bütün senaryoların geçerli not aldığı, % 58 dolaylarındaki küresel verimlilikle enerji dengesi açısından etkili senaryonun çift aşamalı absorpsiyonlu soğutuculu kojenerasyon sisteminin (trijenerasyon) olduğu ve enerji-maliyet bakış açısına göre ise optimal çözümün durum 2 olduğu açıklanmıştır [82].

Birleşik ısı ve güç sistemleriyle optimum enerjik ve maliyetli sonuçların eldesi; değişkenlerin çokluğu, yönetim stratejileri ve tesis konfigürasyonu gibi etkenler sebebiyle karmaşık bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Belli bir hastanenin enerji yükleri doğrultusunda tesis, kojenerasyon sistemi ve kullanıcı etkileşimi göz önünde bulundurularak tahmine dayalı olarak simülatif termo-ekonomik yaklaşımıyla özel bir metodolojinin önerildiği çalışmada belirtilen nedenlerden ötürü kaynaklanan farklılıklara göre toplam enerji tasarrufunun % 4,2 ile % 17,2 aralığında, basit geri ödeme süresinin ise 2,9 ile 8,5 yıl arasında değişebileceği bulunmuştur. Dolayısıyla tahmine dayalı analiz optimal çözümün belirlenmesinde önemlidir. Motor sayısı, motor

boyutu, tesisi konfigürasyonu, yönetim stratejisi vb. seçimlerde bu yaklaşımın kullanılması makul bir kar sağlar. Çalışmaya konu olan vaka çalışması İtalya'nın Napoli şehrindeki Paolo hastanesi içten yanmalı çoklu gaz motorlu kurulumuyla 3,5 yıllık bir geri ödeme süresi ve % 17' nin üzerinde enerji tasarrufu göstermiştir [83].

Birleşik ısı ve güç tesisleri, motor özellikleri ve performansı, motor boyutu, motor sayısı, tesis yönetim planı, enerji maliyetleri, yükün şekli ve boyutu gibi birden fazla değişkene bağlı olarak sonuç sunar. Bu nedenle en iyi enerjik ve ekonomik sonuca ulaşmak için optimal yaklaşımı bulmada öngörüsül bir analize ihtiyaç vardır. Napoli' deki yaklaşık olarak 250 yataklı S. Paolo hastanesinin enerji talepleri doğrultusunda çok amaçlı yaklaşım mantığında optimal çözüm için önerilen özel bir metodolijinin, belli bir CHP gaz motorunun enerji tasarrufunun % 19' lara kadar değişebilmesi nedeniyle tahmine dayalı olması gerektiği savunulmuştur. Birincil enerji tasarrufu (PES) ve basit geri ödeme süresinin (SPB) ters orantılı olmasından dolayı birincil enerji tasarrufunu artırma çabaları geri ödeme süresinin uzamasına neden olacağından basit geri ödemesinin (SPB) optimal yaklaşımlarda direkt baz alınması yanlış bir düşünce olacaktır. Bu yüzden optimal yaklaşımlarda PES ve SPB değerlerinin ödünleşme sağlama gereksinimini ortaya koymaktadır. Önerilen yaklaşımla % 20' ye yaklaşan birincil enerji tasarrufunun yanı sıra yaklaşık % 18' lik enerji tasarrufu, 4 yıllık geri ödeme süresi, 225-240 kW aralığında değişen çıkış gücüyle karakterize edilen üç gaz motorlu senaryo elektrik kesintileri durumunda esneklik ve güç güvenilirliği açısından oldukça yararlıdır [84].

Elektriğin kesintisiz bir şekilde tedarik edilmesi özellikle hastaneler için çok önemlidir. Bu nedenle hastanelere doğal gazlı olarak düşünülen birleşik ısı ve güç sistemleri (CHP) olası bir çözüm olarak görülebilir. Brezilya hastanelerinde gazla çalışan CHP teknik potansiyelini belirlemek için yapılan çalışmada bazı engellere rağmen hastanelerin yüksek enerji talepleri, kesintisiz güç kaynağı ihtiyaçları, maliyeti azaltma çabaları gibi nedenlerden dolayı doğalgaz kaynaklı CHP sistemlerini kurmayı tahrik eder niteliktedir. Çalışmanın amacına ulaşması için çeşitli enerji tüketim göstergeleri oluşturularak enerji tüketimlerine göre 6 kategori altında incelenen hastaneler analiz edilerek CHP potansiyeli tahmin edilmiştir. Hastaneler için gaz yakıtlı motorların gaz türbinli

motorlara göre daha avantajlı olduğunu belirtilirken yaklaşık olarak 500 MW olan CHP teknik potansiyeline sahip Brezilya hastanelerinde bu sistemlerin daha maliyetli olması nedeniyle ve bazı engellerin üstesinden gelinmesi şartıyla uygulanmasının yararlı olabileceği belirtilmiştir [85].

Enerji hizmeti şirketi (ESCO) projesi kapsamında ısıtma, soğutma ve elektrik gücü için kojenerasyon sistemi kurulumunu analiz eden vaka çalışmasında tahrik elemanının iki adet gaz motorlu olması ve oluşan buharın absorpsiyonlu soğutucu desteğiyle ısıtma ve soğutma gücünün karşılanabilmesi enerji tasarrufu sağlayacaktır. Hastanedeki ısı ve elektrik yükünün arasındaki ortalama oran ve ihtiyaç durumunda şebekeden elektrik satın alınması gibi durumlar nedeniyle kojenerasyon sisteminin hastaneler için uygun olduğu belirtilmiştir [86].

Erzurum kampüs hastanesi için trijenerasyon sistemin uygulanabilirliğinin incelendiği çalışmada söz konusu hastane henüz daha proje aşamasında olduğu için aynı yerde bulunan ve hizmet vermekte olan 400 yataklı Erzurum Bölge Eğitim ve Araştırma hastanesinin verileri kullanılarak analiz edildiğinde türbin motorunun gerek maliyetli olması gerekse yüksek enerji ihtiyaçlarında kullanılabilmesi sebebiyle kojenerasyon sisteminin tahrik gücü doğal gaz ile çalışan içten yanmalı motor olarak seçilmesine karar verilmiştir. Ayrıca enerji talebinin değişkenliği göz önünde bulundurularak yüksek verimlilik için sistemin iki motorlu olacak şekilde tasarlanmasının da yararlı olabileceği savunulmuştur. Sistemin matematik modellemesine göre, seçilen motorun gücü belirlenirken çalışma yükünün % 60' in altına inilmemesi gerekliliği, soğuk iklim şartlarındaki bölgeler için gece tarifesinde yaz ve geçiş dönemlerinde sistemin çalıştırılmaması ve talep edilen elektriğin şebekeden alınması gerektiğini ve soğuk bölgelerde geçiş aylarında atık ısının soğutma enerjisi yerine kullanım sıcak suyu üretiminin daha verimli olabileceği savunulmuştur. Çeşitli yük kapasitelerine göre elektriksel termal ve bu değerlere göre ortalama verim değerleri bulunmuş ve gelir gider hesaplamalarına göre sistemin dinamik geri ödeme süresi yaklaşık 2,97 olarak hesaplanmıştır [27].

Kahramanmaraş ilinde bulunan 550 yataklı ve 98.562 m² alana kurulu olan Sütçü İmam Üniversitesi Sağlık Uygulama ve Araştırma hastanesinin enerji talebinin giderilmesinde kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin karşılaştırılmasının yapıldığı araştırmada hangi birleşik sistemin daha ekonomik olacağı belirlenmiştir. Doğal gaz ile çalışan 2 adet gaz motorlu tahrik elemanı ile yapılmasının avantajı olduğu düşünülen sistemlerin her ikisinin de konu olan hastane için verimli olabileceği açıklanmıştır. Sistemlerin geri ödeme sürelerine bakıldığında ise 2,78 yıl olarak bulunan kojenerasyon sisteminin 3,1 yıl olarak bulunan trijenerasyon sisteminden daha kısa bir ödeme süresine sahip olduğu ancak hastanenin bulunduğu coğrafi konum ve iklim özellikleri değerlendirildiğinde özellikle yaz aylarında hava sıcaklığının yüksek olmasından dolayı soğutma ihtiyacının fazla olmasının absorpsiyonlu soğutucunun dahil edildiği trijenerasyon sisteminin uzun vade de daha avantajlı olabileceği açıklanmıştır [4].

Yüksek miktarda enerji tüketen hastanelere kojenerasyon sistemi kurulabilmesi olayı ciddiye alınmalıdır. Burada optimum verim için tasarımdan önce farklı seçeneklerin değerlendirilmesi gerekir. İspanya'nın kuzey kıyı kesiminde bulunan 80.000 m² alana kurulu 1.000 den fazla yatağa sahip olan bölgenin en önemli hastaneleri arasında yer alan hastaneye kurulacak olan kojenerasyon sisteminin tahrik gücü için gaz türbinli, dizel gaz motorlu gibi farklı alternatiflerin değerlendirildiği çalışmada üretilen elektriğin en önemli parametre olması sebebiyle yüksek elektriksel veriminden dolayı dizel motorlu kojenerasyon sistemi gaz türbinli kojenerasyon sistemine göre daha verimli sonuçlar vermiştir. Kojenerasyon sistemlerinin hastane gibi her an elektrik talebinin olacağı yerlerde güvenli ve sürekli elektrik sağlaması, kesintileri azaltması gibi yararlarının olduğu açıklanarak gaz motorlu güç elemanın çalıştırılmasında kullanılacak olan yakıtın (doğalgaz, dizel vb.) ülke bazında politik ve teknik olmayacağı dile getirilmiştir. Gelecekte ise bu tür çalışmalara ek olarak özellikle sıcak iklim bölgelerinde kojenerasyon sistemine soğurmalı soğutucu eklentisiyle soğutma ihtiyacının giderileceği trijenerasyon sistemlerinin de düşünülmesi gerektiği vurgulanmıştır [87].

Enerji tasarrufu bakımından ısı pompaları ve kojenerasyon sistemleri en gelişmiş yaklaşımlardandır. Bu iki sistemin trijenerasyon tesisine entegrasyonu hem kojenerasyon sisteminin hem de ısı pompasının sağladığı avantajları arttıracaktır. 930 yataklı bir

hastane tesisinin enerji yönetimi çerçevesinde karma tamsayı programlama modeli kullanılarak oluşturulan optimizasyon yönteminde direk kojeneratör tarafından tahrik edilen ek ısıtma ve soğutma ihtiyaçları için kullanılan sıkıştırılmalı ve soğurmalı ısı pompalarıyla entegre kojenerasyon sisteminden oluşan bir trijenerasyon sisteminin enerjik, çevresel ve ekonomik olarak fayda sağladığı belirtilmiştir [88].

İstanbul' da 109 yataklı toplam alanı 22.000 m² olan özel bir hastaneye uygulanması planlanan trijenerasyon sisteminin ekonomik analizinin yapıldığı çalışmada uygun malzeme seçimi, üretilecek olan elektrik ve ısıl gücün maksimum seviyede kullanılabilirliği, ilk yatırım masraflarının uygun olması gibi değişkenler sistem seçiminde etkili olmuştur. Bazı kriterler göz önünde bulundurularak türbin ve motor seçenekleri arasında motorlu alternatifin daha uygun bulunduğu ve bu motor gücü için 600 kW, 800 kW, 1.200 kW olmak üzere 3 farklı seçeneğin analiz edildiği araştırmada 800 kW' lik motorun diğerlerine nazaran daha verimli olacağı belirtilerek geri ödeme süresi yaklaşık 2 yıl olarak hesaplanmıştır. Sistemin yıllık olarak hesaplanan; ortalama çalışma oranı, elektrik talebini karşılama oranı ve ısı ihtiyacını karşılama oranı sırasıyla % 91, % 86 ve % 94 olarak bulunarak geriye kalan enerji ihtiyaçları da Tedaş ve İğdaş kurumlarınca karşılanarak maliyet olarak hesaba dahil edilmiştir. Sistem kurulum sürecinde bu gibi ek maliyetlerin en az seviyede seyretmesinin etkili olabileceği dile getirilerek burada devlet desteklerinin de olması gerektiği dile getirilmiştir [35].

Edirne' de kurulacak olan 77.000 m² lik yüzey alanına sahip 300 yataklı bir devlet hastanesinin enerji ihtiyacının giderilmesinde kurulan trijenerasyon santralının ekonomik analizinin yapıldığı çalışmada santrali oluşturan ana ekipmanlar incelenmiş ve bu parçaların hastanenin enerji talebine göre uygun olup olmadığı araştırılmıştır. Sistemin dinamik geri ödeme süresi 3,91 yıl olarak bulunmuş ve trijenerasyon sisteminin hastane için karlı olabileceği sonucuna ulaşılmıştır [19].

Kojenerasyon sistemlerinin başarısında sadece geri ödeme süresinin değil yatırım maliyeti ve yönetim stratejisinin de önemli olduğunun belirtildiği Termoekonomik incelemede Fransa ' da kojenerasyon sistemiyle işleyen hastane, kağıt fabrikası ve sanayi tesisinin yönetimdeki yanlışlardan ötürü kojenerasyon uygulamalarının başarısız olduğu belirtilmiştir. Kullanılan elemanların ömürlerinin mali açıdan önemli olabileceği

sadece geri ödeme süresini azaltmak için yapılan çalışmalarla doğal olarak artan yatırım maliyetleri konvansiyonel yolla elektrik üretimi maliyetinin % 64' ünü geçmeyecek şekilde planlanması gerektiği ifade edilmiştir [89].

Antalya' da bulunan bir hastanenin eski ve yeni binalarına ortak bir trijenerasyon tesisinin yapılmasının ekonomik ve çevresel olarak incelendiği araştırmada enerji verimliliği önlemlerinin alınarak azalan enerji ihtiyacına göre ve enerji verimliliği önlemlerinin alınmadığı iki farklı yöntemle Trijenerasyon tesislerinin fizibilitesi analiz edilerek birbirleriyle kıyaslanmıştır. Sonuçta enerji önlemlerinin alındığı yöntemle daha ekonomik olabileceğinin belirtildiği çalışmada genel olarak her iki yaklaşımında olumlu sonuçlar doğurabileceği açıklanmış ve kojenerasyon teknolojilerinin hastane binalarına uygun bir yatırım kaynağı olabileceği savunulmuştur [90].

Kojenerasyon sistemlerinin maliyet analizinin yapıldığı çalışmada Ankara' da bulunan 22.000 m² lik bir hastaneye ait tüketim değerleri dikkate alınmıştır. Yıllık 5.953.033 kWh elektrik enerjisi üretilmiş ve 5.953.033 kWh ısı enerjisi tasarruf edilmiştir. Toplamda yılda 903.457 TL tasarruf edilmesine neden olabilen kojenerasyon teknolojilerinin yaygınlaşması ve desteklenmesinin gerektiği ifade edilmiştir [7].

Enerji tüketimin yoğun olduğu kompleks yapıların başında hastaneler gelmektedir. Bu nedenle bu yapılarda enerjinin performansı ile ilgilenen enerjinin üretimi, tüketimi yönetimi, verimi, ekonomik değeri, çevreye etkisi gibi konular önemsenmelidir. Bu konuların analiz edilip geçerli yaklaşımlar çerçevesinde planlanması sürdürülebilir geleceği teşvik eder. Araştırmanın "Çok aşamalı ve çok amaçlı optimizasyon" bölümünde kojenerasyon ve trijenerasyon çalışmasına örnek verilmiştir [91].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasında Kars ilinde bulunan bir hastanenin yıllık enerji talepleri doğrultusunda enerji ihtiyacının giderilmesinde, birleşik ısı ve güç teknolojisi olan kojenerasyon ve bu sisteme soğutucu eklenmesiyle oluşan trijenerasyon sistemlerinin maliyet ve enerji açısından uygulanabilirliğinin analizi yapılarak sistemler kıyaslanmış ve hangi sistemin daha uygun olabileceği araştırılmıştır.

3.2. Örnek Hastanenin Tanıtımı

Çalışmaya konu olan hastane Kars ili Merkez ilçede bulunan Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesidir. Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi, 2006 yılı ocak ayında geçici tahsis edilen bir binada 60 yataklı Kafkas Üniversitesi Tıp Fakültesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Merkezi olarak hizmete başlamış ve 2011 kasım ayında yapımı tamamlanarak 276 yataklı yeni hastane binasına taşınmıştır. 2016 yılında ise yeni hastane binasının yanına Onkoloji binası yapılarak şekil 3.1' de gösterilen haline gelmiştir. Hastanede 2019 verilerine göre toplamda 270.209 kişi ayakta; 16.984 kişi ise yatarak tedavi edilmiş olup 16.188 ameliyat gerçekleştirilmiştir. 2019 yılında aktif çalışan kişi sayısı 1.272' dir [92].



Şekil 3.1: Kars Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi

Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi :

- ✓ Başhekimlik,
- ✓ Poliklinikler,
- ✓ Yatan hasta,
- ✓ Onkoloji,
- ✓ Tıp fakültesi

bölmelerinden oluşmaktadır. Tıp fakültesi binası haricindeki diğer binalar bir arada bulunmaktadır. Dolayısıyla bu araştırmada toplamda 51.961,55 m² yüzey alanına kurulu başhekimlik, poliklinik, yatan hasta, onkoloji binalarına kojenerasyon ve trijenerasyonun yapılabilirliği incelenmiştir.

3.3. Örnek Hastanenin Enerji İhtiyacı

Literatür incelendiğinde gerek yapılan çalışmalar gerek ulaşılan sonuçlar gerekse kuramsal bilgiler göz önüne alındığında hastaneler ısı ve gücün yoğun kullanıldığı konutlar olarak karşımıza çıkar. Enerji talep miktarını etkileyen büyüklük, yüzey alanı, yatak sayısı, hizmet verilen birim sayısı vb. yanında hastanenin bulunduğu ilin iklimsel özellikleri de enerji gereksinimi belirleyen önemli bir parametredir. Çünkü harcanan elektriğin ısıtma ve soğutma uygulamalarında kullanılabilmesi ve iklime göre şekillenebilen ısıtma-soğutma talebinin elektrik dışı kaynaktan karşılanması bu kaynağın kullanım miktarını etkiler.

Doğu Anadolu Bölgesi' nin kuzey doğu tarafında yer alan ve bölgenin en soğuk illeri arasında yer alan Kars' ta bir tür karasal iklim çeşidi olan yüksek yayla iklimi görülür. Bu iklime göre kışların soğuk, kar yağışlı, uzun ve sert geçtiği yazlar ise serin geçer. İlkbahar ve sonbahar mevsimleri ise kısa sürmektedir. Türkiye' de soğukların en bariz olduğu ve uzun sürdüğü yerlerdendir. Bu durumun temel nedenleri; yüksek dağ sıralarıyla denizlerin ılımanlaştırıcı etkisinden ayrılması, yüksekliğin fazla olması, kış mevsiminde Büyük Asya kara kütlesi üzerinde yerleşen soğuk ve ağır hava kütesinin (Sibirya yüksek basınç merkezi) buraya kadar sokulmasıdır [93].

Meteoroloji genel müdürlüğünden alınan verilere göre Kars' a ait 1931 - 2019 arası ortalama hava değerleri tablo 3.1' de gösterilmiştir.

Tablo 3.1: Kars'ın 1931-2019 yılları arası meteorolojik verileri [94]

AYLAR	ORTALAMA SICAKLIK (°C)	ORTALAMA EN YÜKSEK SICAKLIK (°C)	ORTALAMA EN DÜŞÜK SICAKLIK (°C)
Ocak	- 10,8	- 4,9	- 16,3
Şubat	- 9	- 2,8	- 14,9
Mart	- 2,9	2,7	- 8,3
Nisan	5,1	11,3	- 0,6
Mayıs	10,2	16,8	3,8
Haziran	13,8	21	6,6
Temmuz	17,5	25,4	9,8
Ağustos	17,8	26,3	9,7
Eylül	13,6	22,2	5,3
Ekim	7,3	15	0,4
Kasım	0,4	6,7	- 4,7
Aralık	- 6,9	- 1,3	- 11,9
YILLIK	4,7	11,5	- 1,8

Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesinin enerji ihtiyaçları belirlenirken 2019 yılına ait aylık kullanılan elektrik ve ısıtma için doğalgaz tüketimleri göz önünde bulundurulmuştur.

3.3.1. Hastanenin Elektrik İhtiyacı

Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi ' nin elektrik gereksinimi aynı zamanda şehrinde elektrik ihtiyacını karşılayan Aras Elektrik Perakende Satış Anonim Şirketi tarafından sağlanarak hastane için aydınlanma, tıbbi cihazların ve her türlü elektrik ve elektronik makinelerin çalışması, ısıtma, soğutma vb. uygulamalar için kullanılmaktadır. Çalışmaya konu olan örnek hastanenin elektrik enerjisi ihtiyacı 2019 yılının ocak, şubat, mart, nisan, mayıs, haziran, temmuz, ağustos, eylül, ekim, kasım, aralık aylarındaki toplam elektrik tüketim miktarına (kWh cinsinden) göre belirlenmiştir. Aylara göre tüketim değerleri ve maliyetleri tablo 3.2' de verilmiştir. Maliyetler hem TL hem de Amerikan doları (USD) cinsinden verilmiştir. 1 USD 7,44 TL olarak alınmıştır. Birim fiyat ve maliyet tutarları Kafkas Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire başkanlığından alınan fatura bilgilerine göre aşağıdaki formüllere göre hesaplanmıştır.

$$\text{Elektriğin birim fiyatı} \left(\frac{TL}{kWh} \right) = \frac{\text{Aylık fatura bedeli (TL)}}{\text{Aylık harcanan elektrik (kWh)}} \quad (3.1)$$

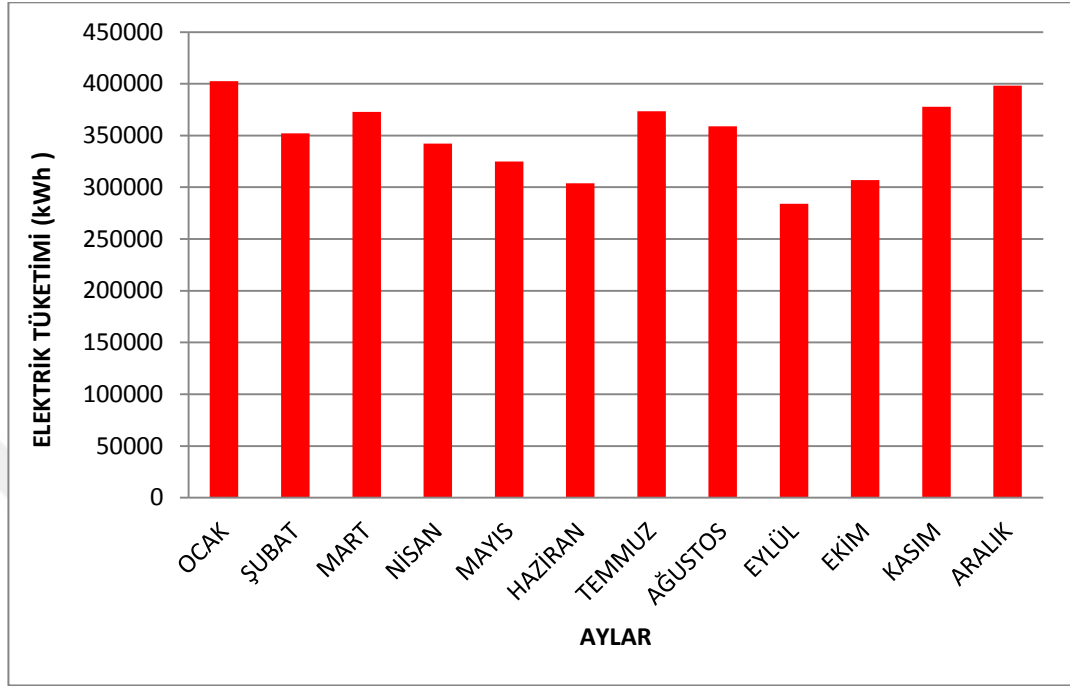
$$\text{Aylık maliyet (TL)} = \text{Harcanan elektrik (kWh)} \times \text{Birim fiyat} \left(\frac{TL}{kWh} \right) \quad (3.2)$$

$$\text{Aylık maliyet (USD)} = \frac{\text{Aylık maliyet (TL)}}{7,44 TL} \quad (3.3)$$

Tablo 3.2: Hastanenin aylara göre elektrik tüketimleri ve maliyetleri

AYLAR	TÜKETİM DEĞERİ (kWh/ay)	BİRİM FİYATI (TL / kWh)	MALİYET (TL)	MALİYET (USD)
Ocak	402.447	0,8656	348.358	46.822,31
Şubat	352.212	0,8656	304.875	40.977,82
Mart	372.730	0,8656	322.635	43.364,92
Nisan	342.177	0,8656	296.188	39.810,22
Mayıs	324.752	0,8656	281.105	37.782,93
Haziran	303.728	0,8656	262.907	35.336,96
Temmuz	373.366	0,8656	323.186	43.438,98
Ağustos	358.894	0,8656	310.659	41.755,24
Eylül	284.021	0,8656	245.849	33.044,22
Ekim	306.897	0,8656	265.650	35.705,65
Kasım	377.871	0,8656	327.085	43.963,04
Aralık	398.237	0,8656	344.714	46.332,53
TOPLAM	4.197.332	-	3.633.211	488.334,8

Aylara göre hastanenin elektrik ihtiyacı sütun grafiği üzerinde şekil 3.2' de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Hastanenin aylara göre elektrik tüketim değerleri

Hastaneye ait aylık veriler incelendiğinde soğuk aylarda (kasım, aralık, ocak, şubat, mart) ve sıcak aylarda (temmuz, ağustos) elektrik tüketiminin diğer aylara göre (bahar ayları) daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durumun oluşmasında kışın doğalgaz kullanımına ek olarak klima sistemlerinin ısıtma modunda çalışması ve yazın ise klima sistemlerinin soğutma modunda çalışmasıdır. Bilindiği üzere klima kullanımı elektrik tüketimini arttırmaktadır. Yıllık toplam 4.197.332 kWh elektrik tüketimine karşı 3.633.211 TL (488.334,8 USD) ödenmiştir.

3.3.2. Hastanenin Isı İhtiyacı

Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi' nin ısı gereksinimi Kars ilinin de doğalgaz dağıtımını yapan KARGAZ Kars Ardahan Doğalgaz Dağıtım Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi tarafından karşılanmaktadır. Diğer konutlardan farklı olarak Kafkas üniversitesi' nin doğalgaz dağıtımını üniversite bünyesinde yer alan 2 adet

ısı merkezi tarafından kontrol edilmektedir. Hastanenin doğalgaz talebi 2 nolu ısı merkezi tarafından karşılanarak alan ısıtma, kullanım sıcak suyu vb. uygulamalar için kullanılmaktadır.

Çalışmaya konu olan hastanenin ısı enerjisi ihtiyacı 2019 yılının ocak, şubat, mart, nisan, mayıs, haziran, temmuz, ağustos, eylül, ekim, kasım, aralık aylarındaki toplam doğalgaz tüketim miktarına (m^3 cinsinden) göre belirlenmiştir. Aylara göre tüketim değerleri ve maliyetleri tablo 3.3' te verilmiştir. Maliyetler hem TL hem de Amerikan doları (USD) cinsinden verilmiştir. Birim fiyat ve maliyet tutarları Kafkas Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı'ndan alınan fatura bilgilerine göre aşağıdaki formüllere göre hesaplanmıştır.

$$\text{Doğalgazın birim fiyatı } \left(\frac{TL}{m^3} \right) = \frac{\text{Aylık fatura bedeli (TL)}}{\text{Aylık harcanan doğalgaz}(m^3)} \quad (3.4)$$

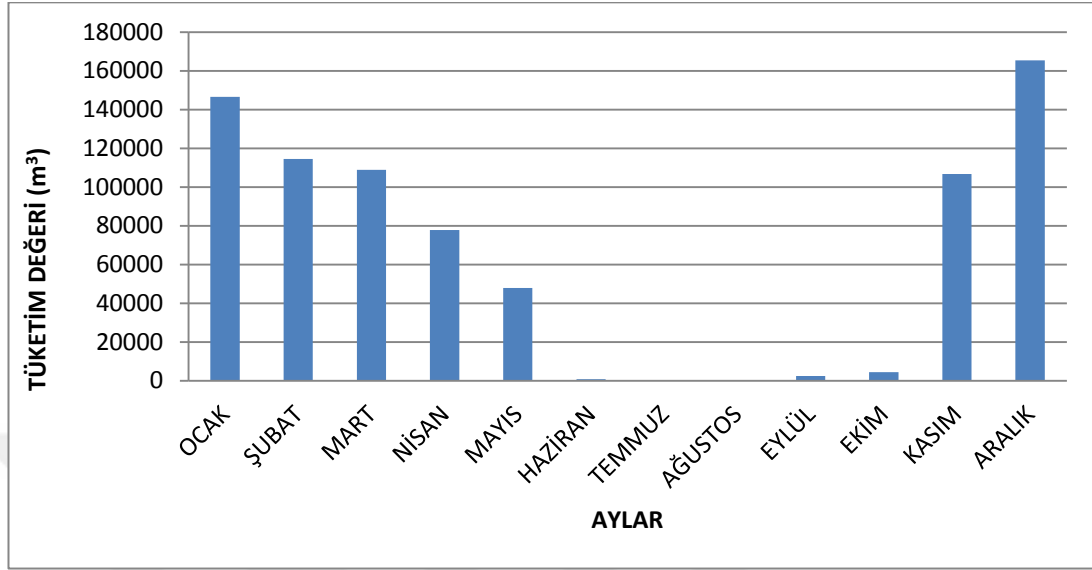
$$\text{Aylık maliyet (TL)} = \text{Harcanan elektrik (kWh)} \times \text{Birim fiyat } \left(\frac{TL}{kWh} \right) \quad (3.5)$$

$$\text{Aylık maliyet (USD)} = \text{Aylık maliyet (TL)} / 7,44 \text{ TL} \quad (3.3)$$

Tablo 3.3: Hastanenin aylara göre doğalgaz tüketimleri ve maliyetleri

AYLAR	TÜKETİM DEĞERİ (m³ / ay)	BİRİM FİYAT (TL / m³)	MALİYET (TL)	MALİYET (USD)
Ocak	146.596	1,8954	277.858	37.346,51
Şubat	114.527	1,8954	217.075	29.176,75
Mart	108.882	1,8954	206.375	27.738,58
Nisan	77.866	1,8954	147.587	19.836,96
Mayıs	47.873	1,8954	90.739	12.196,1
Haziran	857	1,8954	1.624	218,28
Temmuz	163	1,8954	309	41,53
Ağustos	176	1,8954	334	44,89
Eylül	2.457	1,8954	4.657	625,94
Ekim	4.510	1,8954	8.548	1.148,93
Kasım	106.786	1,8954	202.402	27.204,57
Aralık	165.381	1,8954	313.463	42.132,12
TOPLAM	776.074		1.470.971	197.711,2

Aylara göre hastanenin elektrik ihtiyacı sütun grafiği üzerinde şekil 3.3' te gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Hastanenin aylara göre doğalgaz tüketim değerleri

Hastaneye ait aylık veriler incelendiğinde hastanenin ortalama 6 - 7 ay doğalgazı yoğun bir şekilde kullandığı görülür. Bunun nedeni tamamen iklimsel özelliklerle ilgili olup yaz aylarında ise kullanım sıcak suyu ve bazı yaz gecelerinin soğuk olmasından dolayı doğalgaz tüketimi sıfır olmamakla beraber gaz kullanım miktarı bariz bir şekilde azalmaktadır. Yıllık toplam 776.074 m³ doğalgaz tüketimine karşı 1.470.971 TL (197.711,2 USD) ödenmiştir.

3.3.3. Hastanenin Soğutma İhtiyacı

Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi' nin soğutma ihtiyacı elektrik ile çalışan chiller sistemlerinden karşılanmaktadır. Hastanenin, başhekimlik, poliklinikler ve yatan hasta bölümlerinin oluşturduğu ana binasına 3 adet chiller ve onkoloji bölümüne 236 kW' lık güce sahip 1 adet chiller olmak üzere şekil 3.4' te gösterilen toplamda 4 adet soğutucu sistemi tarafından soğutma talebi karşılanmaktadır. Kars' ın iklimsel koşulları gereğince genellikle haziran, temmuz, ağustos ve eylül aylarında hastanenin soğutma talebinin olduğu görülmektedir.



Şekil 3.4: Hastanenin soğutma ihtiyacını karşılayan chiller grubu

3.4. Birleşik Isı ve güç Teknolojisi Sisteminin Seçimi

3.4.1. Sistem Seçimiyle İlgili Genel Bilgiler

Kojenerasyon sistemleri, toplam verimlilik, maliyet ve enerji talepleri göz önünde bulundurularak seçilmelidir. Kojenerasyon için harcanan yatırımlar büyük çapta olduğu için sistem kurulmadan önce detaylı bir şekilde yapılabilirliği ve uygulanabilirliği araştırılmalıdır [22].

Kojenerasyon uygulamalarının fizibilitesinde genel olarak aşağıdaki faktörler rol oynamaktadır [22]:

- ✓ Birimin enerji talebi
- ✓ Birimin ısı ve elektrik tüketimi
- ✓ Birimin yıllık aktif olduğu süre
- ✓ Enerji kaynaklarının bulunabilirlikleri
- ✓ Enerji kaynaklarının mali olarak uygulanabilirlikleri

Bir kojenerasyon uygulaması; Güç, Elektrik/ısı oranı ve Toplam verim gibi parametrelerle ifade edilir [22].

1. Güç : Birim zamanda üretilen elektrik enerjisi miktarını gösterir. kW, MW vb. birimlerle ifade edilerek kojenerasyon tesislerinin güç aralıkları kW boyutlarından yüzlerce MW boyutlarına kadar geniş bir yelpazededir.
2. Elektrik / ısı değeri : İşletmede birim zamanda üretilen elektrik enerjisinin ısı enerjisine bölümüyle bulunur. Aylık veya yıllık verilere göre de yapılabilir. Kısaca EIO olarak gösterilir.

$$EIO = \frac{\text{üretilen elektrik enerjisi}}{\text{üretilen ısı enerjisi}} \quad (3.6)$$

3. Verim : İşletmede üretilen toplam enerjinin (elektrik + ısı), toplam harcanan yakıt miktarına oranıyla bulunur. Sistemin başarısını gösteren bir parametredir. Kojenerasyon teknolojileri % 90' lık verim değerine ulaşabilirler.

$$\text{Toplam verim} = \frac{\text{Üretilen toplam enerji}}{\text{Tüketilen yakıt enerjisi}} \quad (3.7)$$

Kojenerasyon sistemi seçilirken tablo 3.4' te yer alan değişkenler dikkate alınır.

Tablo 3.4: Birleşik ısı ve güç teknolojileri seçiminde etkili olan kriterler [22]

KRİTER	ÖZELLİĞİ
YAKIT	Ana taşıyıcının tahrik kaynağını oluşturan yakıt çeşidi veya çeşitlerine göre kojenerasyon sistemine karar verilir. Genellikle tek yakıt kullanılmasına karşın bazı sistemler iki veya üç yakıtlı olabilir. Bazen kojenerasyon sistemi seçimi sadece yakıt türü dikkate alınarak karar verilir. Yakıt belirlemede en önemli etkenlerden birisi yakıt fiyatlarıdır. Türkiye' de doğalgazın bulunduğu yerlerde sistem ekonomik olmakla birlikte sistemlerin geri ödeme süresi 2 yıl veya daha az olabilmektedir. Ana taşıyıcıda kullanılabilen yakıt çeşidi fazlaştıkça gaz türbini kullanmaya eğilim olur.
ELEKTRİK / ISI ORANI	İşletmenin ısı ve elektrik talepleri sisteme karar verme aşamasında çok önemli bir rol oynar. Bu önem sıfırdan yapılacak ve ısı - elektriksel enerji olarak herhangi bir yatırım yapılmamış işletmelerde daha da önemli konuma gelir. Gaz türbinlerde EIO 0,4-0,5; Gaz motorlarında ise EIO 0,75-0,80 dolaylarındadır.
YÜK EĞRİSİ	İşletmenin elektrik ve ısı yük dağılımlarına göre sisteme karar verilir. Çeşitli zaman dağılımlarında (günlük, haftalık, yıllık) yük talebi düzensiz ise ihtiyaç birkaç ünite ile karşılanabilir.
BAŞLAMA SAYISI	Yıllık başlama sayıları fazla olan tesisler devreye alınabilmelerinin basitliği sebebiyle ana taşıyıcı olarak gaz motoru kullanılmalıdır.
SICAKLIK	Ortam sıcaklığının değişimine karşı gaz türbinleri gaz motorlarına göre daha hassas olup sıcaklığın değişken olduğu tesislerde sıcaklığın değişiminden çok fazla etkilenmeyen gaz motorları tercih edilmelidir.
SİSTEM KAPASİTESİ	Birim zamanda üretilen elektrik miktarının 15 -20 MW ' ın üzerinde gaz türbini altında ise gaz motoru kullanılır. Türkiye şartlarında elektriğin maliyetli olmasından dolayı gaz motorlarının elektriksel veriminin yüksek olması sebebiyle tercih edilmeleri daha avantajlı olacaktır.
ELEKTRİK KAPASİTESİ	Elektrikteki frekans ve gerilim değerlerine karşı hassas cihazların bulunduğu işletmelerde mali konulara bakılmaksızın tercihlerini gaz motorlarına, aksi durumda ise gaz türbinlerine yönlendirmelidirler.

3.4.2. Örnek Hastaneye Uygun Birleşik Isı ve Güç Sistemi Seçimi

3.4.2.1. Güç Kaynağı Seçimi

Aşağıda belirtilen özelliklere göre güç kaynağı seçimi yapılmıştır.

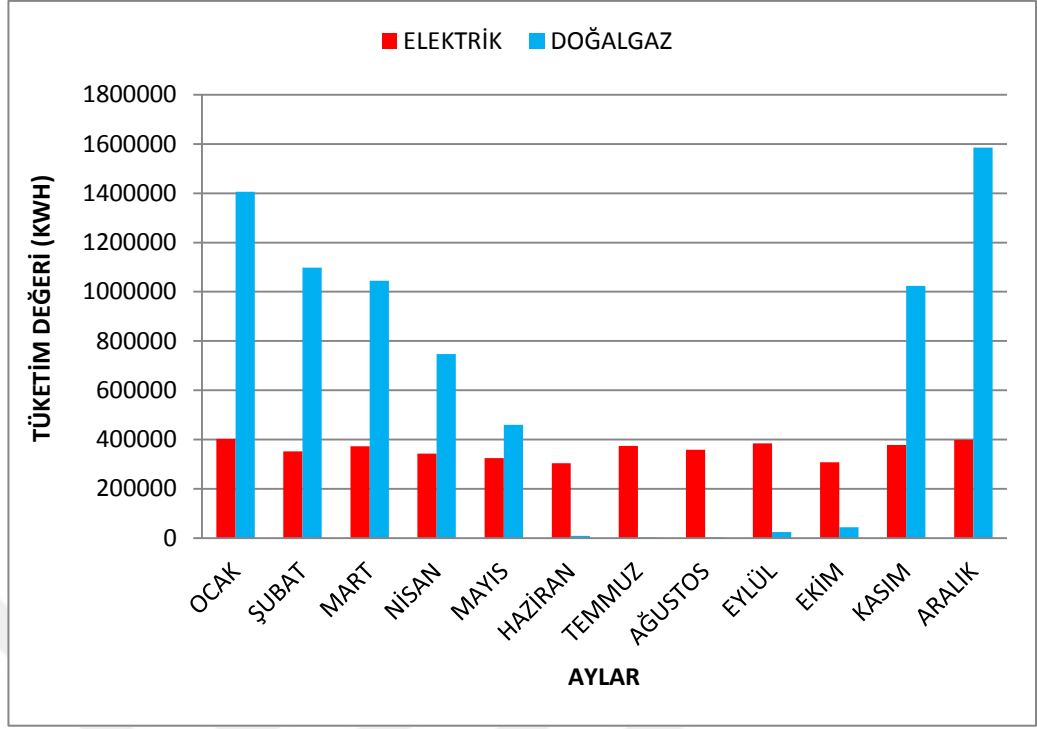
- ✓ Hastaneye ait elektrik ve ısı tüketimleri incelendiğinde elektrik tüketiminin ısı tüketimine göre daha düzenli bir çizgide seyretmesinden ötürü sistemin tasarımı öncelikle elektriksel üretimi karşılayabilecek şekilde planlanması daha doğru bir seçim olacaktır. Doğalgazın tüketim değerini normalde m³ cinsinden kWh birimine çevirmek için doğalgazın alt ısı değeri kullanılır (doğalgazın alt ısı değeri 9,59 kWh' tir) ve aylık toplam kWh cinsinden bulmak için denklem (3.8) kullanılır. Aylara göre hastanenin elektrik ve doğalgaz tüketimleri kWh cinsinden tablo 3.5' te, sütun grafiği şeklinde de şekil 3.5' te gösterilmiştir.

$$1 \text{ m}^3 \text{ doğalgaz} = 9,59 \text{ kWh}$$

$$\text{Doğalgazın tüketim değeri (kWh)} = \frac{\text{Doğalgazın tüketim değeri (m}^3\text{)}}{1} \times 9,59 \quad (3.8)$$

Tablo 3.5: Aylara göre elektrik ve doğalgaz tüketim değerleri

AYLAR	ELEKTRİĞİN TÜKETİM DEĞERİ (kWh/ay)	DOĞALGAZIN TÜKETİM DEĞERİ (kWh/ay)
Ocak	402.447	1.405.856
Şubat	352.212	1.098.314
Mart	372.730	1.044.178
Nisan	342.177	746.735
Mayıs	324.752	459.102
Haziran	303.728	8.219
Temmuz	373.366	1.563
Ağustos	358.894	1.688
Eylül	284.021	23.563
Ekim	306.897	43.251
Kasım	377.871	1.024.078
Aralık	398.237	1.586.004
TOPLAM	4.197.332	7.442.551



Şekil 3.5: Aylara göre elektrik ve doğalgaz tüketim değerleri

- ✓ Türkiye'de elektriğin pahalı olması nedeniyle tasarımın elektrik ihtiyacı dikkate alınarak yapılması daha ekonomik olacaktır.
- ✓ Hastanenin elektriksel talebine göre gücü 1,5 MW' tan küçük olduğu için küçük ölçekli kojenerasyon uygulamalarına örnek teşkil edeceği ve bu tipte uygulamalara da gaz motorlarının kullanılmasının avantajlı olabileceği çalışmada önceki sayfalarda belirtilmiştir.
- ✓ Elektriksel ihtiyaç ön planda olacağı için elektrik veriminin diğer ana taşıyıcılara göre daha yüksek olduğu gaz motorları daha avantajlı olacaktır.
- ✓ Hastanelerde elektriğin günlük ihtiyacının saatlere göre değişip düzensiz olması [42] bu talebe cevap verebilecek gaz motorlarını rakiplerine göre ön plana çıkarır.
- ✓ Kars' ın iklimsel özelliklerine göre günlük sıcaklığın değişken olması (örnek olarak gündüzün sıcak gecenin soğuk olması) sıcaklığa daha duyarlı cevap verebilen gaz motorlarını kullanmayı gerekli kılar.
- ✓ Sisteme daha kolay dahil edilebilmeleri nedeniyle gaz motorları diğerlerine nazaran daha avantajlı olurlar.

- ✓ Hastanelerde hassas elektronik cihazlar (ultrason, EKG, röntgen, MR, laboratuvar, anestezi, hasta odası ekran, test vb. cihazlar) sayıca fazla olduğundan gaz motorunun ürettiği elektrik daha düzenli ve kullanılabilir olacaktır.

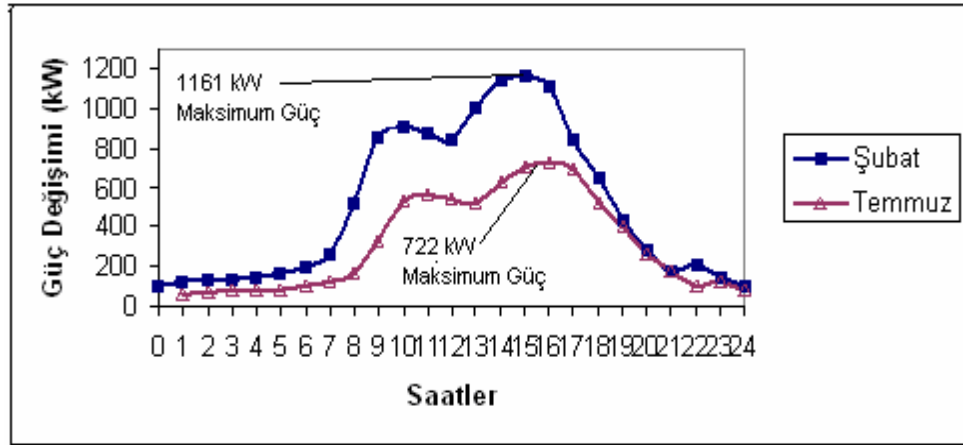
3.4.2.2. Güç Kaynağı Kapasitesi Belirleme

Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi' nin ısı ve elektrik ihtiyacını karşılamak için gaz motorlu kojenerasyon sistemlerinin gücü elektriksel talep ön planda tutularak planlandığı için elektriksel tüketimin en fazla olduğu Ocak ayına göre güç belirleme yapılacaktır. Ocak ayına ait saatlik ortalama tüketim değeri hesabı tablo 3.6' da gösterilmiştir.

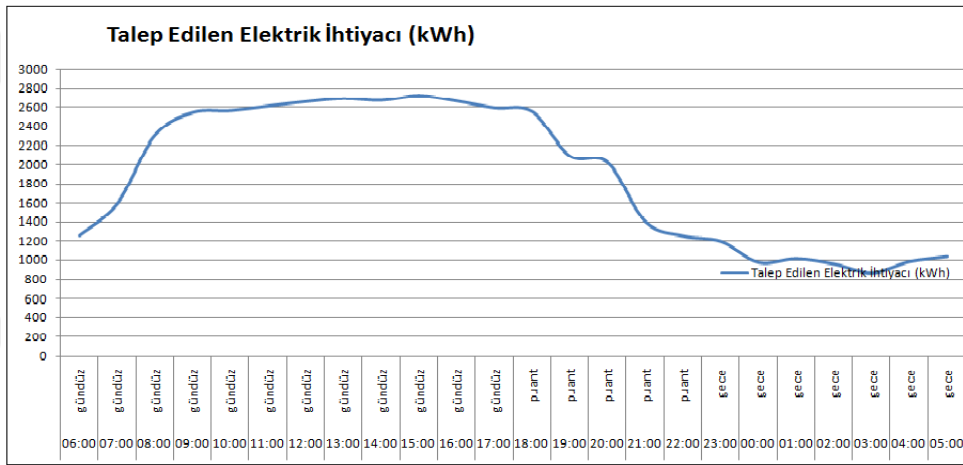
Tablo 3.6: Ocak ayının saatlik tüketim değeri hesabı

Elektriksel tüketimin en fazla olduğu ay	Tüketim değeri (kWh / ay)	Saatlik tüketim değeri (kWh)
Ocak	402.447	$Saatlik\ tüketim = \frac{402447}{31 \times 24} = 541\ kWh$

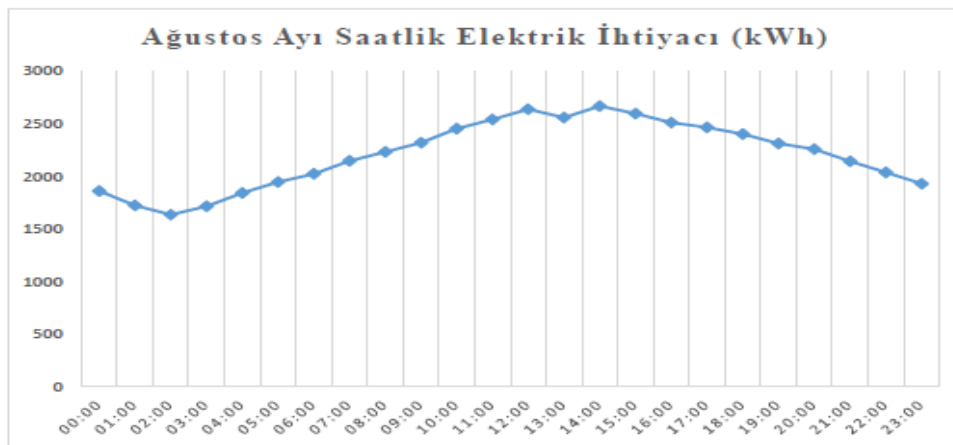
Hastaneler 7 / 24 saat sürekli bir şekilde elektrik enerjisi kullanırlar. Ancak kullanılan bu elektrik gün içerisinde saatlere göre farklılaşmaktadır [42]. Çakır [42], Ekinci [27] ve Kısakesen' in [4] çalışmaları incelendiğinde elektriğin tüketiminin sabah saatlerinden öğle saatlerine doğru arttığı ve öğleden sonra ise azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.6: Aziziye araştırma hastanesinin günlük elektrik tüketimi [42]



Şekil 3.7: Erzurum kampüs hastanesinin günlük elektrik tüketimi [27]



Şekil 3.8: KSÜ hastanesinin günlük elektrik tüketimi [4]

Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi' nin elektriğin en çok harcandığı ocak ayı için saatlik ortalama tüketim değeri 541 kWh olarak bulunmuştur. Bu değer ortalama bir değeri belirttiğinden yapılan çalışmalarda baz alınarak saatlik en fazla ve en az tüketim değeri ortalama değere yaklaşık 250 kWh eklenip çıkartıldığında ocak ayı için günlük en az ve en fazla tüketim değerleri yaklaşık olarak aşağıdaki gibi olacaktır. 250 kWh değeri hastanenin yatak sayısı, büyüklüğü, enerji ihtiyacı gibi değişkenler dikkate alınarak geçmiş çalışmalardan yararlanılarak alınan yaklaşık bir değerdir.

✓ **En az tüketim** = 541 kWh - 250 kWh = 297 kWh

✓ **En fazla tüketim** = 541 kWh + 250 kWh = 791 kWh

olarak bulunur.

Dolayısıyla Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi için yaklaşık 400 kWh elektriksel çıkış gücüne sahip 2 adet gaz motoru kojenerasyon veya trijenerasyon sistemi için uygun olacaktır.

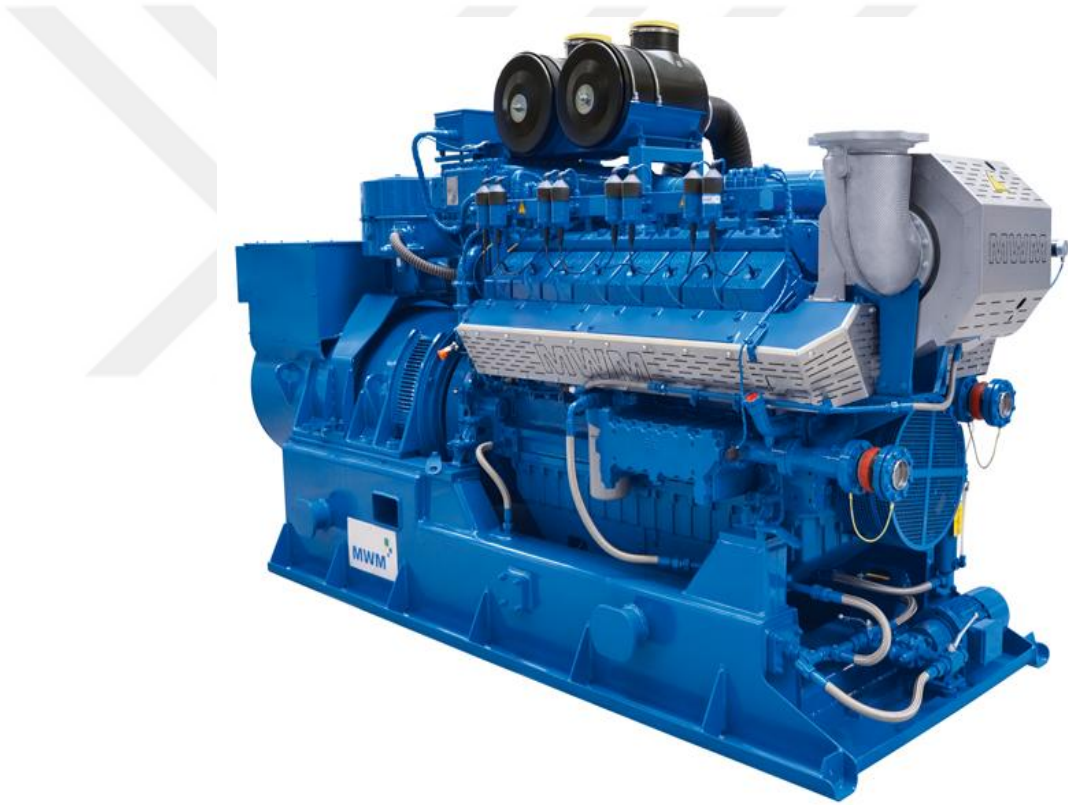
3.4.2.3. Yakıt seçimi

Gaz motorlu kojenerasyon sistemlerinde geniş yakıt yelpazesine sahip olmasına rağmen genellikle doğalgaz kullanılır. Bunun nedenlerini şu şekilde sıralayabiliriz:

1. Yakıtın yapısındaki metan (CH_4) sayısının fazla olması (100' e yakın) yakıttan yararlanma oranını yani verimini artırır. Doğalgazda bu sayı 72 - 95 arasında değişmekte olup iyi sayılacak ölçüde olup önemli bir fosil yakıttır [22]. Bunun yanında,
 - ✓ Çevreyi kirleticiliğinin diğer fosil yakıtlara göre az olması
 - ✓ Sürekli ulaşılabilir olup depolama gerektirmemesi
 - ✓ Ucuz olması
 - ✓ Kokusuz olması

Karsta doğal gaz hattı bulunduğu için sistemin ana taşıyıcısı olarak öngörülen gaz motorlu sistemin yakıtının doğalgaz olarak düşünülüp planlanması avantajlı olacaktır.

2. Sonuç olarak Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi için şebekeyle paralel doğalgaz ile çalışan 2 adet 400 kWh gücünde gaz motorlarının kullanılacağı kojenerasyon veya trijenerasyon sistemi uygun görülmüştür. İki adet motorun kullanılma sebebi herhangi bir arıza durumunda sistemin enerji üretiminin devam etmesi ve hastanenin değişken yük talebine karşılık motorun veriminin düşecek olmasıdır. Sistemde kullanılması düşünülen gaz motorunun resmi şekil 3.9' da ve motora ait özellikler tablo 3.7' de verilmiştir.



Şekil 3.9: MWM TCG 2016 V8C model gaz motoru [95]

Tablo 3.7: MWM TCG 2016 V8C model gaz motoruna ait özellikler

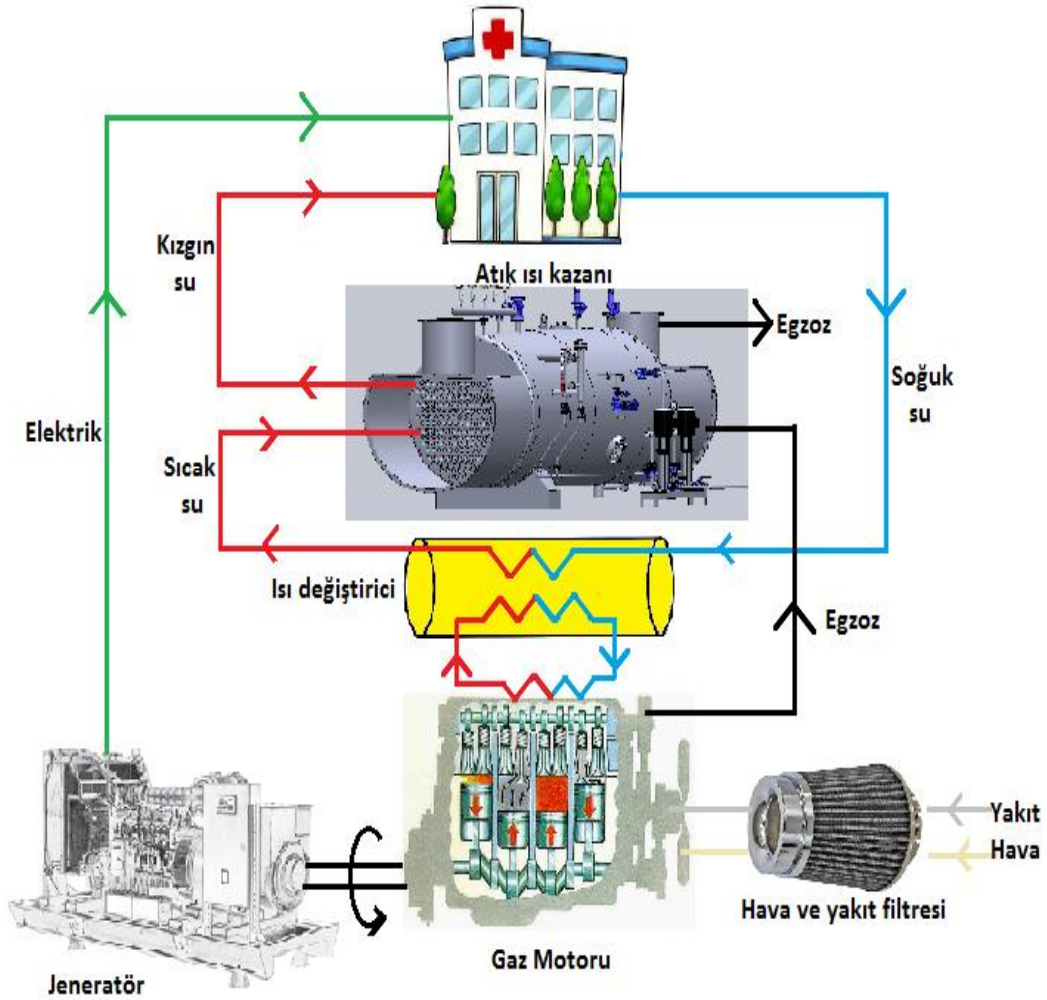
GAZ MOTORU		TCG 2016 V8C
Özellikler	Birim	Değeri
Elektrik çıkış gücü	kW	400
Egzoz debisi	kg/h	2.186
Egzoz sıcaklığı	°C	457
Ceket suyu ısısı	kW ± %8	205
Egzoz ısısı	kW ± %8	226
Yakıt tüketimi	kW ± %5	945
Elektrik verimi	%	42,3
Isı verimi	%	48,3
Toplam verimi	%	90,6
Ceket suyu akış miktarı	m ³ / h	24
Ceket suyu giriş sıcaklığı	°C	84
Ceket suyu çıkış sıcaklığı	°C	92

3.5. Sistem tasarımları

3.5.1. Kojenerasyon Sisteminin Tasarımı

Hastaneye kurulmasının araştırıldığı kojenerasyon sisteminin akışı şu şekilde düşünülmüştür:

Yakıt ve hava ayrı ayrı filtre sisteminden geçerek temizlenip motora girer. Yakıtın yanmasıyla elde edilen mekanik güç jeneratörde elektrik enerjisine dönüştürülerek tüketici birime yani hastaneye iletilir. Bu sırada motorun yanmasıyla elde edilen gövde ısısı da denilen ceket ısısını ve egzoz gazındaki ısının geri kazanılması için ısı değıştirici ve atık ısı kazanı devreye girer. Hastaneden gelen soğuk su ilk olarak ısı eşanjörüne girerek motordaki soğutma suyu nedeniyle bir miktar ısınır ve atık ısı kazanına gider. Burada egzozdaki ısı sebebiyle iyice ısınarak kullanılabilir hale gelir ve hastanenin ısıtma birimlerine girer. Kullanılan su ısısı alınmış vaziyette ısı değıştiriciye girerek çevrim tamamlanmış olur. Sistemin tasarımı şekil 3.10' da verilmiştir.

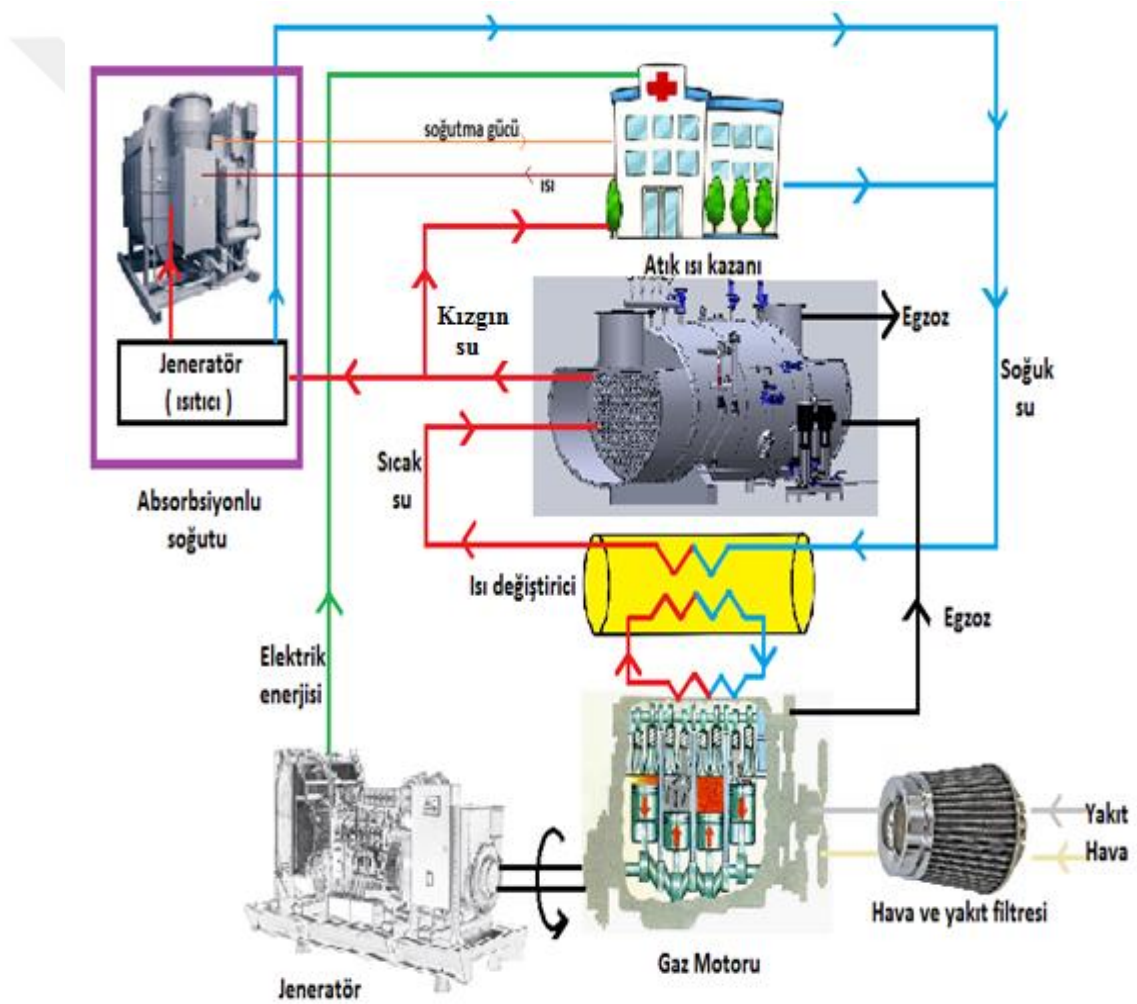


Şekil 3.10: Kojenerasyon sisteminin genel tasarımı

3.5.2. Trijenerasyon Sisteminin Tasarımı

Hastaneye kurulmasının araştırıldığı trijenerasyon sisteminin akışı şu şekilde düşünülmüştür:

Sistemin daha önce anlatılan kojenerasyon sisteminden tek farkı absorpsiyonlu soğutucunun devreye dahil edilmesidir. Atık ısı kazanından çıkan sıcak su ihtiyaca göre hastaneye ve / veya absorpsiyonlu soğutucuya gider. Özellikle yaz aylarında daha yoğun bir şekilde soğutucu ünitesine giderek burada soğutma gücü elde edilerek hastaneye verilir. Sistemin tasarımı şekil 3.11' de verilmiştir.



Şekil 3.11: Trijenerasyon sisteminin genel tasarımı

3.6. Seçilen Motora Göre Sistemin Isıtma ve Soğutma Kapasitesinin Belirlenmesi

Sistemin elektrik gücü, doğalgaz ile beslenen ve 400 kW elektrik çıktısına sahip olan 2 adet gaz motorundan sağlanacaktır. Bu nedenle sistemin elektrik kapasitesi toplamda 800 kW olacaktır.

$$\dot{Q}_{El} = 800 \text{ kW}$$

\dot{Q}_{El} : sistemin elektrik enerjisi kapasitesi (kW)

Gaz motorunun ürün katalogunda yer alan özelliklerinden ve bazı termodinamiksel bağıntılardan yararlanarak kurulması planlanan sistemlerin ısıtma ve soğutma gücü fizibilite analizi için gereklidir.

3.6.1. Isıtma Kapasitesinin Belirlenmesi

Hastaneye kurulacak sistemin ısıtma gücü, ısı eşanjörleri yardımıyla çekilen ısı enerjisi ile sınırlıdır. Bu ısı eşanjörleri; ceket suyu için plakalı eşanjör, egzoz gazı ısısı için ise boru tip eşanjördür.

Isı geri kazanımı, sistemde bulunan 2 kaynaktan kazanılan ısıların toplamı şeklinde hesaplanarak yapılır.

1. Motorun ceket suyunun soğutulmasıyla elde edilen ısı
2. Egzoz gazından çekilen ısı

Her iki kaynaktan kazanılan ısı enerjileri toplamı sistemin ısıl gücünü verecektir.

$$\dot{Q}_I = \dot{Q}_C + \dot{Q}_E \text{ (kW)} \quad (3.9)$$

\dot{Q}_I : Sistemin toplam ısıl gücü (kW)

\dot{Q}_C : Ceket suyundan kazanılan ısı (kW)

\dot{Q}_E : Egzoz gazından kazanılan ısı (kW)

1. Ceket suyundan kazanılan ısıyı bulmak için plakalı ısı değiştiriciler kullanılır. Motora ait veriler ve bazı kabuller yapılarak bulunur. Sistem kurulumunda 2 adet motor olacağından her bir motordan kazanılan ısılar bulunup toplanarak \dot{Q}_C değeri bulunur. Sistemin şeması şekil 3.13' de verilmiştir.



şekil 3.12: Plakalı ısı değiştirici [63]

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c \times \Delta T \text{ (kW)} \quad (3.10)$$

\dot{Q} : Isıl güç (kW)

\dot{m} : Kütlesel debi (kg/s)

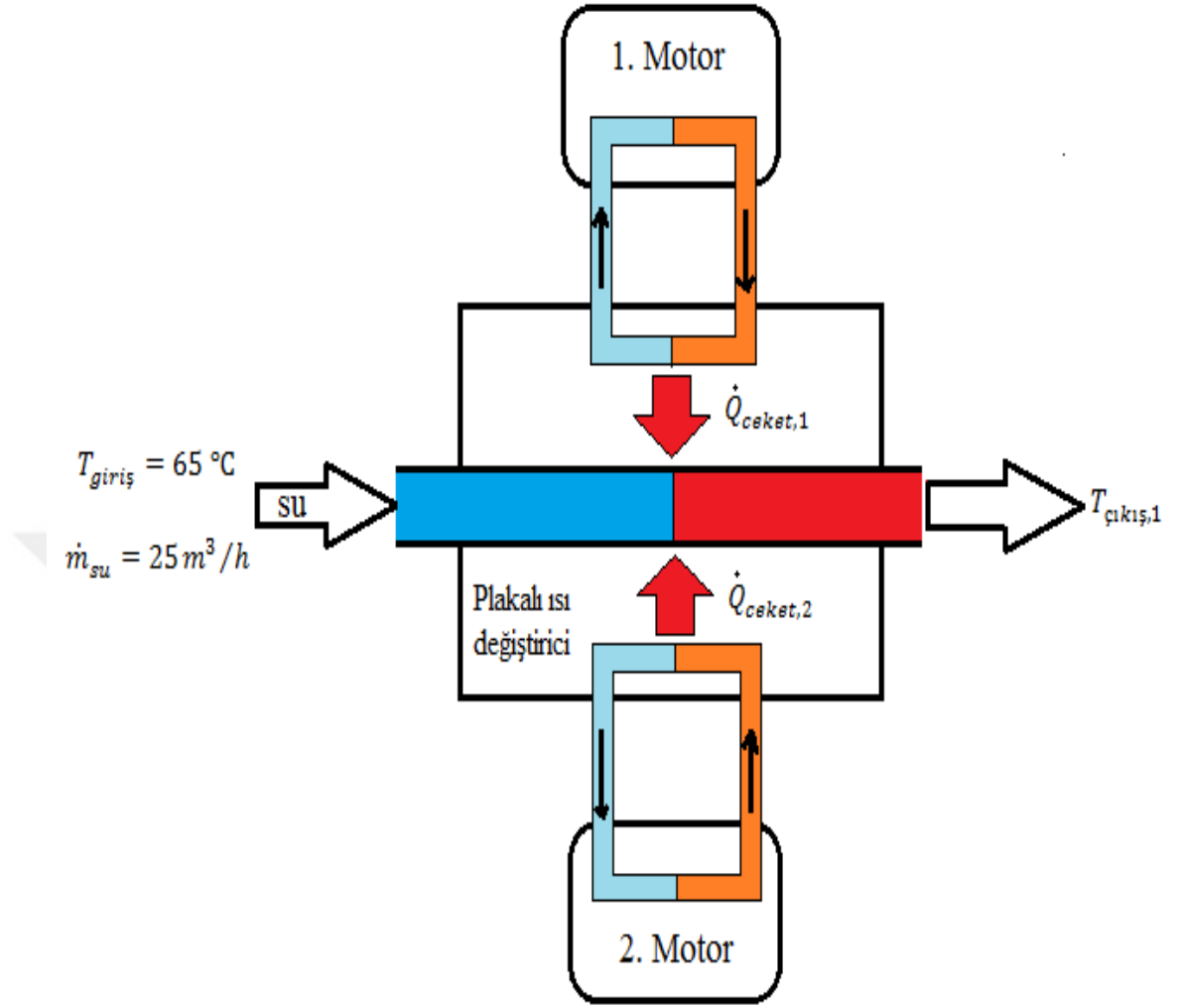
c : Özgül ısı ($kJ/kg.K$)

ΔT : Sıcaklık değişimi ($^{\circ}C$ veya K)

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_{ceket,1} + \dot{Q}_{ceket,2} \text{ (kW)} \quad (3.11)$$

$\dot{Q}_{ceket,1}$: 1. motordan kazanılan ceket ısısı (kW)

$\dot{Q}_{ceket,2}$: 2. motordan kazanılan ceket ısısı (kW)



Şekil 3.13: Motorlardan kazanılan ceket ısısı şeması

Suyun giriş sıcaklığı 65 °C ve giriş debisi 25 m³ / h olarak kabul edilmiştir. Ceket suyunun dolanma debisi 24 m³ / h 'tır. Bu değer ve motora ait diğer özellikler motorun katalog verileri dikkate alınmıştır. Ceket suyundan kazanılan ısı aşağıdaki bağıntılar yardımıyla bulunmuştur. Motor ceket suyu / soğutma suyu olarak etilen glikol kullanılmıştır. Karsın iklim koşulları göz önünde bulundurularak kütlece % 50 etilen glikol - % 50 su karışımı şeklinde sistemin daha güvenli çalışabileceği düşünülmüştür. Dolayısıyla ceket suyunun (etilen glikol) öz ısı (c) ve yoğunluk (ρ) değerleri bu oran dikkate alınarak tablodan okunmuştur.

$$\dot{Q}_{ceket,1} = \dot{m}_{ceket\ suyu,1} \times c_{ceket\ suyu,1} \times \Delta T_{ceket\ suyu,1} \quad (3.12)$$

$$\dot{m}_{ceket\ suyu,1} = 24 \text{ m}^3/\text{h} = 24 \text{ m}^3/\text{h} \times 1077,7 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 1 \text{ h}/3600\text{s} = 7,185 \text{ kg}/\text{s}$$

$$c_{ceket\ suyu,1} = 3,250 \text{ kJ}/\text{kg.K} \text{ (Kütlesel \%50 Etilen glikol - \%50 su karışımında)}$$

$$\Delta T_{ceket\ suyu,1} = T_{motor,çıkış} - T_{motor,giriş}$$

$$T_{motor,çıkış} = 92^\circ\text{C}$$

$$T_{motor,giriş} = 84^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{ceket\ suyu,1} = 92^\circ\text{C} - 84^\circ\text{C} = 8^\circ\text{C} \text{ (veya } 8 \text{ K)}$$

$$\dot{Q}_{ceket,1} = 7,185 \text{ kg}/\text{s} \times 3,250 \text{ kJ}/\text{kg.K} \times 8 \text{ K}$$

$$\dot{Q}_{ceket,1} = 186,81 \text{ kW}$$

Benzer şekilde $\dot{Q}_{ceket,2}$ bulunur. Motorlar özdeş olduğunda değerler aynıdır.

$$\dot{Q}_{ceket,2} = \dot{m}_{ceket\ suyu,2} \times c_{ceket\ suyu,2} \times \Delta T_{ceket\ suyu,2} \quad (3.13)$$

$$\dot{Q}_{ceket,2} = 7,185 \text{ kg}/\text{s} \times 3,250 \text{ kJ}/\text{kg.K} \times 8 \text{ K}$$

$$\dot{Q}_{ceket,2} = 186,81 \text{ kW}$$

Ceket suyundan kazanılan toplam ısı ise

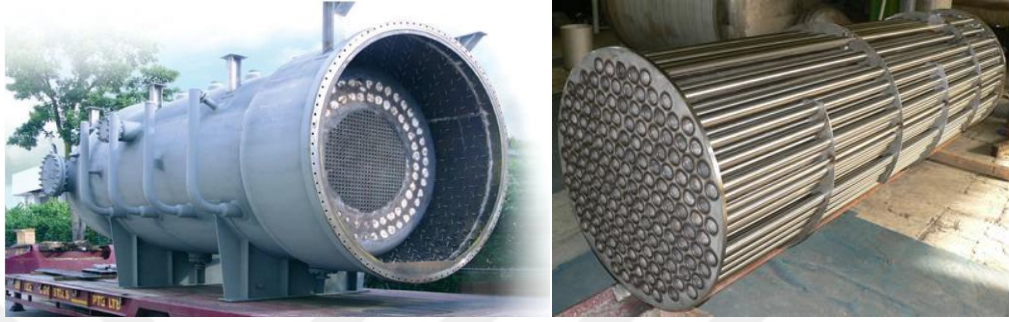
$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_{ceket,1} + \dot{Q}_{ceket,2} \quad (3.11)$$

$$\dot{Q}_C = 186,81 + 186,81$$

$$\dot{Q}_C = 373,62 \text{ kW}$$

olarak bulunur.

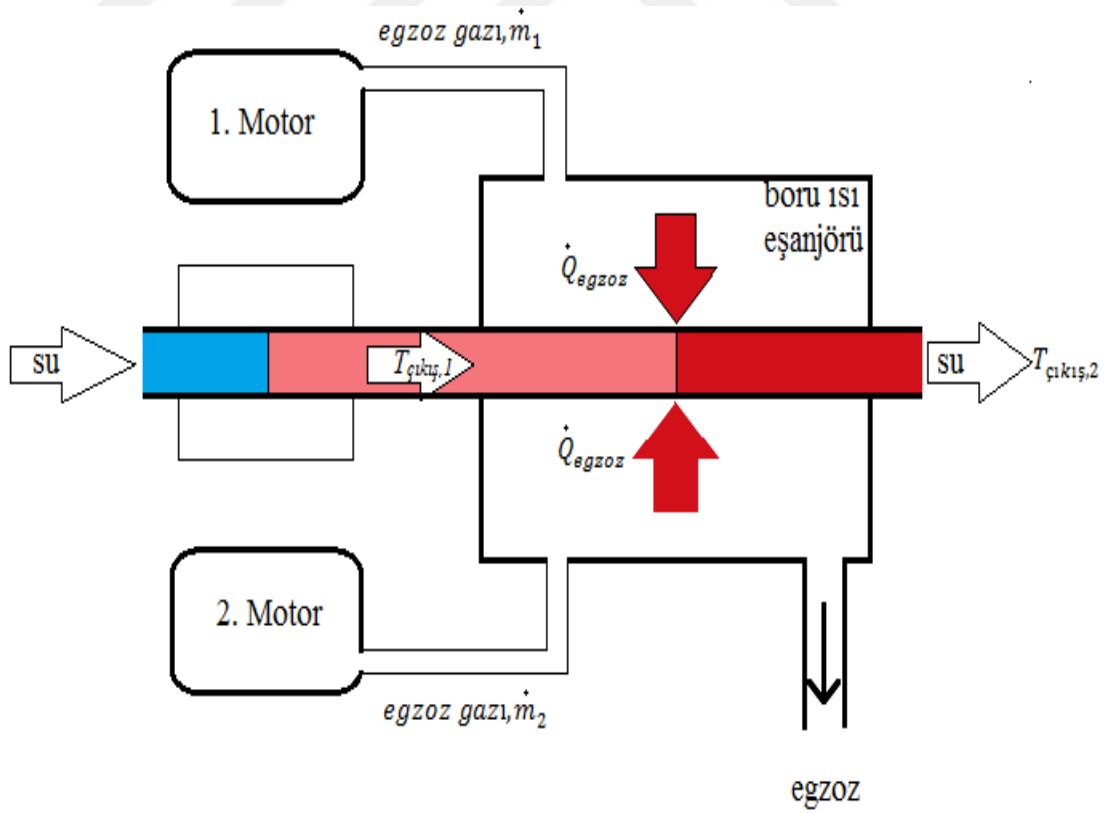
2. Atık ısı kazanında egzoz gazından çekilen ısıyı bulmak için borulu atık ısı kazanları içerisindeki boru tip eşanjörlerden yararlanır. Bazı kabuller yaparak bulabiliriz. Sistem iki motorlu olarak düşünüldüğünden borulu egzoz eşanjörüne giren egzoz gazının toplam debisi $\dot{m}_1 + \dot{m}_2$ şeklinde formüle dahil edilerek hesaplanır. Sistemin şeması şekil 3.15' te verilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 3.14 : Atık ısı kazanı a) Dış yapısı [59], b) Atık ısı kazanı içindeki boru tip egzoz eşanjörünün iç yapısı [19]



Şekil 3.15: Borulu eşanjörde egzozdan kazanılan ısı şeması

Egzoz gazının eşanjörü terk etme sıcaklığı 135 °C kabul edilerek ve motorun katalog verileri kullanılarak aşağıdaki bağıntılar yardımıyla egzozdan kazanılan ısı \dot{Q}_E bulunmuştur.

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c \times \Delta T \text{ (kW)} \quad (3.10)$$

$$\dot{Q}_E = (\dot{m}_{egzoz,1} + \dot{m}_{egzoz,2}) \times c_{egzoz,ort} \times \Delta T_{egzoz} \quad (3.14)$$

$$\dot{m}_{egzoz,1} = \dot{m}_{egzoz,2}$$

$$\dot{m}_{egzoz,1} = 2186 \text{ kg/h} = 2186 \text{ kg/h} \times 1 \text{ h}/3600\text{s} = 0,607 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{egzoz,2} = 0,607 \text{ kg/s}$$

$$c_{egzoz,457^\circ\text{C}} = 1214,5 \text{ J/kg.K}$$

$$c_{egzoz,135^\circ\text{C}} = 1110,3 \text{ J/kg.K}$$

$$c_{egzoz,ort} = \frac{c_{egzoz,457^\circ\text{C}} + c_{egzoz,135^\circ\text{C}}}{2}$$

$$c_{egzoz,ort} = \frac{1214,5 \text{ J/kg.K} + 1110,3 \text{ J/kg.K}}{2}$$

$$c_{egzoz,ort} = 1162 \text{ J/kg.K}$$

$$\Delta T_{egzoz} = T_{egzoz,giriş} - T_{egzoz,çıkış}$$

$$T_{egzoz,giriş} = 457 \text{ °C}$$

$$T_{egzoz,çıkış} = 135 \text{ °C}$$

$$\Delta T_{egzoz} = 457^\circ\text{C} - 135^\circ\text{C} = 322^\circ\text{C} \text{ (veya } 322 \text{ K)}$$

$$\dot{Q}_E = (0,607 + 0,607) \text{ kg/s} \times 1162 \text{ J/kg.K} \times 322 \text{ K}$$

$$\dot{Q}_E = 454235 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_E = 454,235 \text{ kW}$$

Ceket suyu ve egzoz gazından kazanılan ısı gücün toplamı;

$$\dot{Q}_I = \dot{Q}_C + \dot{Q}_E \quad (3.9)$$

$$\dot{Q}_I = 373,62 \text{ kW} + 454,235 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_I = 827,855 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_I \cong 828 \text{ kW}$$

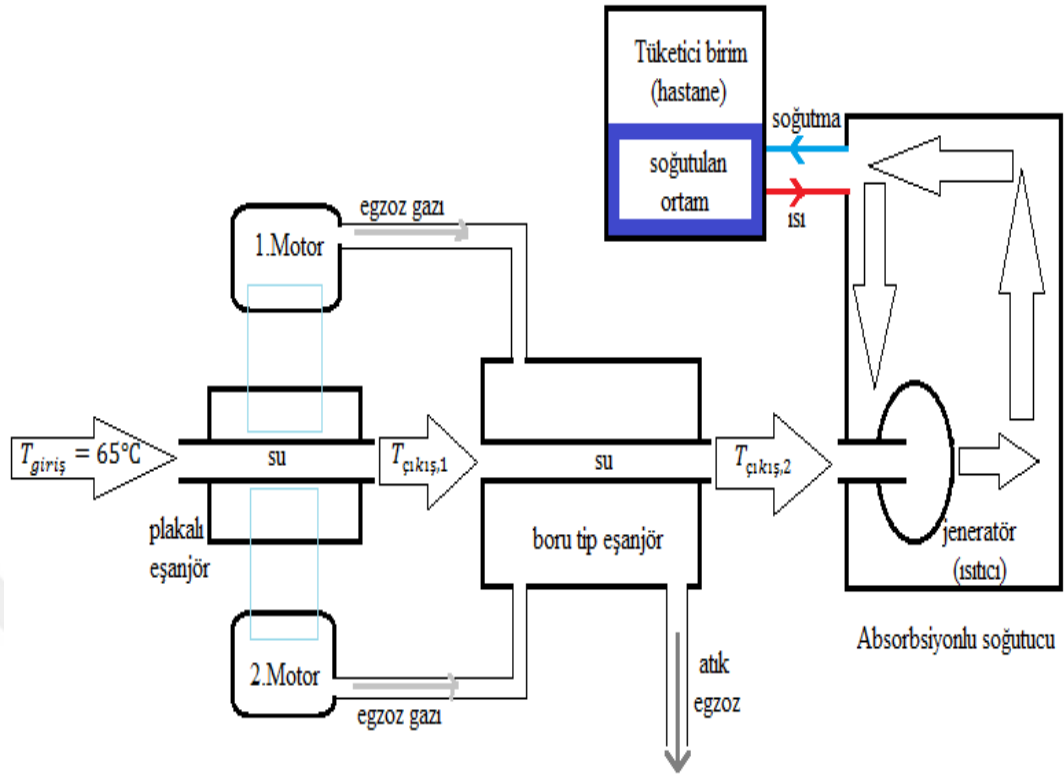
olarak bulunur. Bulunan 828 kW'lık ısı kapasitesi sistemde bulunan her iki motorun çalıştırılmasıyla elde edilebilecek olan yaklaşık güç değeridir. Dolayısıyla her bir motor;

$$\dot{Q}_{\text{tek motor,ısı}} = \dot{Q}_I / 2 = 828 \text{ kW} / 2 = 414 \text{ kW'lık}$$

ısı üretebilme kapasitesine sahip olacaktır.

3.6.2. Soğutma Kapasitesinin Belirlenmesi

Hastaneye kurulacak sistem soğutucu akışkan olarak suyun, absorblayıcı olarak ise lityum bromürün kullanıldığı tek kademeli absorpsiyonlu soğutma sistemidir. Bu sistemde soğutma gücü boru tip eşanjörden gelen sıcak kaynağın ısıtıcıyı tahrikiyle başlayan çevrimle elde edilir. Sistem şekil 3.16' da gösterildiği gibi ilk olarak plakalı eşanjör daha sonra ise boru tip eşanjörden iyice ısınmış olarak gelen su tahrikiyle tüketici birimin genellikle yaz mevsimi olmakla beraber soğurma ihtiyacı karşılanır.



Şekil 3.16: Isı geri kazanım ve soğutma şeması

Isının sıcaklığı az olan bir yerden fazla olan bir bölgeye transfer olayı soğutma olarak adlandırılır. Soğutma sistemlerinin ısıl analizi İngilizce " Coefficient of Performance" (COP) olan performans katsayısı değeriyle saptanır. Bu değer aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir [60].

$$COP_{SM} = \frac{\text{elde edilmek istenen}}{\text{harcanan}} = \frac{\text{soğutma etkisi}}{\text{iş girişi}} = \frac{Q_s}{W_{net,g}} \quad (3.15)$$

COP_{SM} : Soğutma makinesinin performans katsayısı değeri

Q_s : Soğutulan ortamdaki çekilen ısı (kJ)

$W_{net,g}$: Çevrimde dolaşan akışkan üzerinde yapılması gereken sıkıştırma işi (kJ)

Soğurmalı sistemlerde ise COP değeri aşağıda belirtilmiştir [60].

$$COP_{SM} = \frac{\text{elde edilmek istenen}}{\text{harcanan}} = \frac{Q_s}{Q_{ısıtıcı} + W_{pompa,g}} \cong \frac{Q_s}{Q_{ısıtıcı}} \quad (3.16)$$

Burada $Q_{1sıt1c1}$ dış kaynaktan beslenen ısı miktarını tanımlar. Sistemde bu değer $T_{ç1k1ş,2}$ sıcaklığına sahip olan su ile sağlanacak ısıdır. Tersinmezliklerin yer almadığı tümünden tersinir döngülerde soğurmalı sistemlerin COP değeri maksimum olacaktır. Buradaki olay carnot makinesiyle karakterize edilir. Dolayısıyla carnot makinesi ile tahrik edilen soğutma sisteminin gücü denklem 3.17 ile bulunabilir [60].

$$Q_L = W \times COP_{SM,C} = \eta_{th,C} \times Q_{1sıt1c1} \times COP_{SM,C} \text{ (kJ)} \quad (3.17)$$

Burada $\eta_{th,C}$ Carnot makinesinin verimidir. Soğurmalı soğutma sistemlerinin tümünden tersinir olması halinde COP değeri denklem (3.18) ile hesaplanabilir [60],

$$COP_{SM,tr} = \frac{Q_S}{Q_{1sıt1c1}} = \eta_{th,C} \times Q_{1sıt1c1} \times COP_{SM,C} = \left(1 - \frac{T_{ç}}{T_{1sıt1c1}}\right) \left(\frac{T_S}{T_{ç} - T_S}\right) \quad (3.18)$$

T_S : soğutulan ortamın sıcaklığı (K)

$T_{ç}$: çevrenin sıcaklığı (K)

$T_{1sıt1c1}$: ısıtıcının sıcaklığı (K)

COP_{SM} değeri her zaman $COP_{SM,tr}$ değerinden küçük olacaktır. Şimdi şekil 2.14' te belirtilen $T_{ç1k1ş,2}$ değerini yani $T_{1sıt1c1}$ değerini bularak ve bazı kabuller yaparak hastaneye kurulması planlanan sistemin maksimum değerini ($COP_{SM,tr}$) hesaplayalım.

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c \times \Delta T \text{ (kW)} \quad (3.10)$$

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 \quad (3.19)$$

$$\dot{m}_1 \times c_1 \times \Delta T_1 = \dot{m}_2 \times c_2 \times \Delta T_2 \quad (3.20)$$

$T_{ç1k1ş,2}$ değerini hesaplayabilmek için ilk olarak $T_{ç1k1ş,1}$ değerini hesaplamamız gerekir. $T_{ç1k1ş,1}$ değeri plakalı eşanjörden çıkan suyun sıcaklığıdır. Bunun için ısı eşitlik ceket suyu ve normal dolaşım suyu arasında kurulur.

$$\dot{Q}_{ceket\ suyunun\ verdiği} = \dot{Q}_{suyun\ aldığı} \quad (3.21)$$

$$\dot{Q}_{ceket\ suyunun\ verdiği} = \dot{m}_{su} \times c_{su} \times \Delta T_{su} \text{ (kW)} \quad (3.22)$$

$\dot{Q}_{ceket\ suyunun\ verdiği}$ değeri ısıtma g¼c¼ kapasitesinde belirlenen \dot{Q}_C değeridir. Bu değeri ısıtma kapasitesi hesabında 373,62 kW olarak hesaplamıştık.

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_{su} \times c_{su} \times \Delta T_{su} \text{ (kW)} \quad (3.23)$$

$$373,62kW = \dot{m}_{su} \times c_{su} \times \Delta T_{su}$$

$$\rho_{su,65^\circ C} = 980,49 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_{su} = 25 \text{ m}^3/\text{h} = 25 \text{ m}^3/\text{h} \times 980,49 \text{ kg/m}^3 \times 1 \text{ h}/3600\text{s} = 6,81 \text{ kg/s}$$

$$c_{su,65^\circ C} = 4,1869 \text{ kJ/kg.K}$$

$$\Delta T_{su} = T_{\text{çıkış,1}} - T_{\text{giriş}}$$

$$T_{\text{giriş}} = 65^\circ C$$

$$373,62kW = \dot{m}_{su} \times c_{su} \times \Delta T_{su}$$

$$373,62kW = 6,81 \text{ kg/s} \times 4,1869 \text{ kJ/kg.K} \times (T_{\text{çıkış,1}} - 65)K$$

$$T_{\text{çıkış,1}} = 78,1^\circ C$$

olarak bulunur. Bu değer motorun ceket ısısıyla ısınan suyun plakalı eřanj¼rden çıkış, borulu eřanj¼re ise giriş sıcaklığıdır. Benzer mantıkla borulu eřanj¼rden suyun çıkış sıcaklığını $T_{\text{çıkış,2}}$ bulalım.

$$\dot{Q}_{boru\ eřanj¼r¼n\ verdiği} = \dot{Q}_{suyun\ aldığı} \quad (3.24)$$

$$\dot{Q}_{boru\ eřanj¼r¼n\ verdiği} = \dot{m}_{su} \times c_{su} \times \Delta T_{su} \text{ (kW)} \quad (3.25)$$

$\dot{Q}_{boru\ eřanj¼r¼n\ verdiği}$ ısı değeri ısıtma g¼c¼ kapasitesinde belirlenen \dot{Q}_E değeridir. Yani boru tip eřanj¼rde egzozdan kazanılan ısı değeridir. Bu değeri ısıtma kapasitesi hesabında 454,235 kW olarak hesaplamıştık.

$$\dot{Q}_E = \dot{m}_{su} \times c_{su} \times \Delta T_{su} \text{ (kW)} \quad (3.26)$$

$$454,235 \text{ kW} = \dot{m}_{su} \times c_{su} \times \Delta T_{su}$$

$$\rho_{su,78,1^\circ\text{C}} = 972,95 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_{su} = 25 \text{ m}^3/\text{h} = 25 \text{ m}^3/\text{h} \times 972,95 \text{ kg/m}^3 \times 1 \text{ h}/3600 \text{ s} = 6,76 \text{ kg/s}$$

$$c_{su,78,1^\circ\text{C}} = 4,195 \text{ kJ/kg.K}$$

$$\Delta T_{su} = T_{\text{çıkış},2} - T_{\text{çıkış},1}$$

$$T_{\text{çıkış},1} = 78,1^\circ\text{C}$$

$$373,62 \text{ kW} = \dot{m}_{su} \times c_{su} \times \Delta T_{su}$$

$$454,235 \text{ kW} = 6,76 \text{ kg/s} \times 4,195 \text{ kJ/kg.K} \times (T_{\text{çıkış},2} - 78,1) \text{ K}$$

$$T_{\text{çıkış},2} = 94,1^\circ\text{C}$$

olarak bulunur. Bu sıcaklık motorun egzoz ısıyla ısınan suyun boru eşanjörden çıkış, absorpsiyonlu soğutucunun jeneratör elemanına yani ısıtıcıya giriş sıcaklığıdır. Dolayısıyla $T_{\text{ısıtıcı}}$ sıcaklığıdır. Soğutulan ortamın sıcaklığını (T_S) -5°C , soğutucu sistemin çalıştığı çevrenin sıcaklığını ($T_Ç$) ise 25°C olarak kabul edersek seçtiğimiz motora göre en yüksek COP değeri;

$$COP_{mak} = \left(1 - \frac{T_Ç}{T_{\text{ısıtıcı}}}\right) \left(\frac{T_S}{T_Ç - T_S}\right) = \left(1 - \frac{25 + 273}{94,1 + 273}\right) \left(\frac{-5 + 273}{(25 + 273) - (-5 + 273)}\right)$$

$$COP_{mak} = 1,68$$

olarak bulunur. Bulunan COP_{mak} veya başka bir ifadeyle $COP_{SM,tr}$ değerine göre sistemin maksimum soğutma gücü ise,

$$COP_{SM} = \frac{\dot{Q}_S}{\dot{Q}_{\text{Isıtıcı}}} \quad (3.16)$$

$$\dot{Q}_S = COP_{SM} \times \dot{Q}_{\text{Isıtıcı}} \text{ (kW)} \quad (3.27)$$

bağıntısıyla bulunabilir. $\dot{Q}_{\text{Isıtıcı}}$ ifadesi sistemin ceket suyu ve egzoz gazından kazanılan ısıdır. Yani,

$$\dot{Q}_{\text{Isıtıcı}} = \dot{Q}_C + \dot{Q}_E \text{ (kW)} \quad (3.9)$$

$$\dot{Q}_{\text{Isıtıcı}} = 373,62 \text{ kW} + 454,235 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{Isıtıcı}} = 827,855 \text{ kW}$$

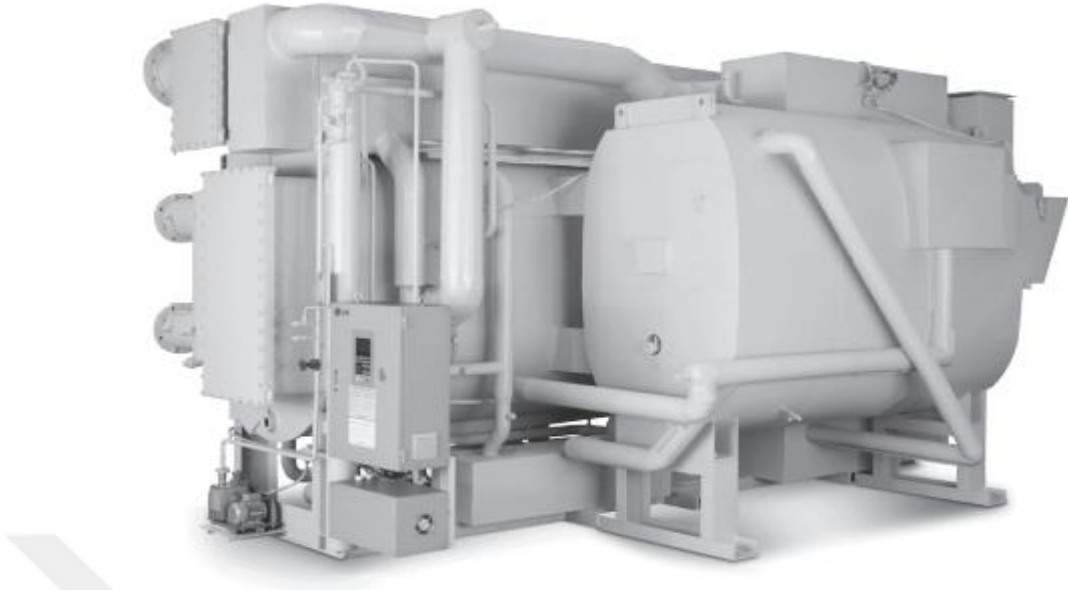
$$\dot{Q}_{\text{Isıtıcı}} \cong 828 \text{ kW}$$

olarak ısıtma kapasitesi belirleme bölümünde belirlenen ısı güçtür. \dot{Q}_S ise,

$$\dot{Q}_S = 1,68 \times 828 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_S = 1391 \text{ kW}$$

olarak hesaplanır. Bulunan bu değer hastanenin maksimum soğutma gücüdür. Araştırmaya konu olan hastaneye COP değeri 0,8 olan şekil 3.17' de gösterilen LG WCMH model absorpsiyonlu soğutucu hastanenin soğutma kapasitesine uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 3.17: LG WCMH model absorpsiyonlu soğutucu [96]

Soğutucunun COP ve sistemin ısıtma gücü verilerine göre hastanenin soğutma gücü

$$COP_{SM} = \frac{\dot{Q}_s}{\dot{Q}_{ısıtıcı}} \quad (3.16)$$

$$\dot{Q}_s = COP_{SM} \times \dot{Q}_{ısıtıcı} \quad (3.27)$$

$$\dot{Q}_s = 0,8 \times 828kW$$

$$\dot{Q}_s = 662kW$$

olarak hesaplanır. Bulunan 662 kW'lık soğutma kapasitesi sistemde bulunan her iki motorun %100 çalışma yükü koşulları altında çalışmasıyla elde edilebilecek olan soğutma gücüdür. Dolayısıyla her bir motor ;

$$\dot{Q}_{tek\ motor,soğutma} = \dot{Q}_s / 2 = 662kW / 2 = 331\ kW'lık$$

soğutma kapasitesine sahip olur.

Sonuç olarak kojenerasyon ve trijenerasyon sistemine ait elektrik, ısı ve soğutma enerji kapasiteleri;

$$\dot{Q}_{El} = 800 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_I = 828 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_S = 662 \text{ kW}$$

olarak bulunur. Bu değerler iki motorun %100 çalışma yükü altındaki sistem kapasitelerini vermektedir. Her bir motora düşen kapasiteler ise;

$$\dot{Q}_{tek\ motor,elektrik} = 400 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{tek\ motor,ısıtma} = 414 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{tek\ motor,soğutma} = 331 \text{ kW}$$

büyükliğünde olacaktır. Bu değerlere göre sistemin 1 kW'lık elektrik üretimine sadece ısı üretim ve sadece soğutma üretim kapasiteler aşağıdaki gibi olacaktır.

$$1 \text{ kW'lık elektrik üretimine karşı} \rightarrow \frac{414 \text{ kW}}{400 \text{ kW}} \rightarrow 1,035 \text{ kW'lık ısı üretimi}$$

$$1 \text{ kW'lık elektrik üretimine karşı} \rightarrow \frac{331 \text{ kW}}{400 \text{ kW}} \rightarrow 0,8275 \text{ kW'lık soğutma üretimi}$$

Motor 400 kW elektrik üretimine karşı katalog verilerine göre yaklaşık 945 kW'lık doğalgaz yakar. 9,59 kWh doğalgazın alt ısıl değeridir. Dolayısıyla motorun her 1 kW elektrik üretimine karşı yaktığı yakıtın miktarı m^3 değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$1 \text{ m}^3 \text{ doğalgaz} = 9,59 \text{ kWh}$$

$$1 \text{ kW'lık elektrik üretimine karşı} \rightarrow \frac{945 \text{ kW}}{400 \text{ kW}} \rightarrow 2,3625 \text{ kW'lık yakıt tüketimi}$$

$$2,36 \text{ kW'lık yakıt} \rightarrow \frac{2,3625}{9,59} \cong 0,2463 \text{ m}^3 \text{ doğalgaz}$$

$$1 \text{ kW'lık elektrik üretimine karşı} \rightarrow 0,2463 \text{ m}^3 \text{ doğalgaz harcanır.}$$

3.7. Sistemin Ekonomik Analiz Kriterleri

Kojenerasyon ve/veya trijenerasyon sistemlerinin herhangi bir işletmeye uygun olup olmamasının analiz edilmesinde ekonomik değerler çok büyük bir paya sahiptir. Bu yüzden detaylı bir şekilde sistemin mali incelemesi yapılmalıdır. Yapılan bu incelemeler sonucunda rakip sistemlere göre fayda / zarar kıyaslamasıyla sistemin yapılabilirliğine karar verilir. Kojenerasyon ve trijenerasyon uygulamalarının ekonomik olarak değerlendirilmesinde genellikle statik ve dinamik değerlendirme yöntemleri kullanılır. Statik yöntemlerde para bugünkü değeriyle hesaba katılırken dinamik yöntemlerde ise maliyetin zaman değeri dikkate alınarak geri ödeme süreleri bulunur. Bu tarz projelerde dinamik yöntemler daha yaygındır [22].

Bu çalışmada sistemin amortisman değeri, statik ve dinamik geri ödeme süreleri bulunarak kojenerasyon ve trijenerasyon uygulamaları karşılaştırılmıştır. Bu değerlerin hesaplanmasında kullanılacak bağıntılar aşağıda verilmiştir.

1. Amortisman fiyatı kurulacak kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin kullanılabilir ömürlerine yatırım maliyetlerinin pay edilmesiyle hesaplanır. Bir yıllık süre zarfında toplam kurulum maliyetinin ne kadarının giderileceğini belirten yıllık amortisman bedelinde tesisin yaşam döngüsündeki tüm yılların aynı amortisman sağlamasıyla yapılan hesaplamalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Amortisman fiyatı aşağıdaki bağıntıyla hesaplanabilir [97].

$$C_K = I \left[\frac{f(1+f)^n}{(1+f)^n - 1} \right] \quad (3.28)$$

C_K : yıllık amortisman bedeli (TL/yıl)

I : ilk yatırım değeri (TL)

f : yıllık faiz oranı (%)

n : kullanım ömrü (yıl)

2. Geri ödeme süresi, sistemin eski uygulamaya kıyasla yıllık kazandıracağı kar bedelinin yatırım maliyetini geride bıraktığı süredir. Tüketiciye net para kazancı zamana göre farklılaşmıyorsa yada paranın bugünkü değeri önemsenmiyorsa geri ödeme süresi statik metotla yapılır. Statik geri ödeme süresi aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır [22].

$$t_s = \frac{G_y}{G_i} \quad (3.29)$$

t_s : statik geri ödeme süresi (yıl)

G_y : ilk yatırım maliyeti (TL)

G_i : yıllık net kazanç (TL)

3. Dinamik geri ödeme süresinde ise paranın zaman bağımlı olarak değişimi göz önünde bulundurularak net para girdisinin yatırım maliyetini karşıladığı süredir. Dinamik geri ödeme süresi aşağıdaki formülle hesaplanır [27].

$$t_g = \frac{\ln \left\{ \frac{G_i}{G_i - G_y \times f} \right\}}{\ln(1 + f)} \quad (3.30)$$

t_g : dinamik geri ödeme süresi (yıl)

G_y : ilk yatırım maliyeti (TL)

G_i : yıllık net kazanç (TL)

f : yıllık faiz oranı (%)

3.8. Kojenerasyon ve Trijenerasyon Sistemlerinin Mali Değerleri

Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi' ne kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin kurulmasında öngörülebilir mali rakamlar aşağıda açıklanmıştır.

3.8.1. Kojenerasyon Sistemlerinin Giderleri

Kojenerasyon sistemlerinin giderlerini ilk yatırım maliyeti ve işletme maliyetleri olarak iki temel grupta inceleyebiliriz. Bu giderler şunlardır:

1. İlk yatırım maliyetleri

- i) Gaz motorları ve elemanları maliyeti
- ii) Isı kazanım birimleri ve elemanları maliyeti
- iii) Yapım ve kurulum maliyetleri
- iv) Belirsiz maliyetler

2. İşletme maliyetleri

- i) Yakıt giderleri
- ii) Yağ, soğutma suyu vb.
- iii) Çalışan ücretleri
- iv) Sigorta masrafları
- v) Enerji piyasası düzenleme kurumu (EPDK) harcamaları

Tablo 3.8 ve tablo 3.9' da kojenerasyon sistemine ait yatırım kaynaklarının yaklaşık değerleri verilmiştir. Değerler hesaplanırken $1 \text{ €} = 9,03 \text{ TL}$ olacak şekilde alınmıştır.

Tablo 3.8: Kojenerasyon sisteminin ilk yatırım kaynaklarının mali değerleri

İlk yatırım kaynakları	Yatırım değeri (€)	Yatırım değeri (TL)
Gaz motorları ve elemanları	320.000	2.889.600
Isı kazanım birimleri ve elemanları	90.000	812.700
Yapım ve kurulum işleri	10.000	90.300
Belirsiz	4.000	36.120
TOPLAM	424.000	3.828.720

Tablo 3.9: Kojenerasyon sisteminin ilk işletme giderlerinin mali değerleri

İlk işletme giderleri	Maliyet (€)	Maliyet (TL)
Yağ, soğutma suyu vb.	7.500	67.725
Çalışanlar	2.000	18.060
Sigorta	4.500	40.635
EPDK	2.000	18.060
TOPLAM	16.000	144.480

3.8.2. Trijenerasyon Sistemlerinin Giderleri

Trijenerasyon sistemlerinin giderlerini de kojenerasyon sistemleri gibi ilk yatırım maliyetleri ve işletme maliyetleri olarak iki temel grupta inceleyebiliriz. Maliyetler genel olarak aynı olmakla beraber absorpsiyonlu soğutucu giderleri Trijenerasyon

maliyetlerinin kojenerasyon maliyetlerinden fazla olmasına neden olmuştur. Trijenerasyon sistemlerine ait giderler şunlardır:

1. İlk yatırım maliyetleri

- i) Gaz motorları ve elemanları maliyeti
- ii) Isı kazanım birimleri ve elemanları maliyeti
- iii) Absorbsiyonlu soğutma sistemleri ve elemanları maliyeti
- iv) Yapım ve kurulum maliyetleri
- v) Belirsiz maliyetler

2. İşletme maliyetleri

- i) Yakıt giderleri
- ii) Yağ, soğutma suyu vb.
- iii) Çalışan ücretleri
- iv) Sigorta masrafları
- v) Enerji piyasası düzenleme kurumu (EPDK) harcamaları

Tablo 3.10 ve tablo 3.11' de trijenerasyon sistemine ait yatırım kaynaklarının yaklaşık değerleri verilmiştir. Değerler hesaplanırken 1 € = 9,03 TL olacak şekilde alınmıştır.

Tablo 3.10: Trijenerasyon sisteminin ilk yatırım kaynaklarının mali değerleri

İlk yatırım kaynakları	Yatırım değeri (€)	Yatırım değeri (TL)
Gaz motorları ve elemanları	320.000	2.889.600
Isı kazanım birimleri ve elemanları	90.000	812.700
Absorbsiyonlu soğutma sistemleri ve elemanları	130.000	1.173.900
Yapım ve kurulum işleri	11.000	99.330
Belirsiz	4.000	36.120
TOPLAM	555.000	5.011.650

Tablo 3.11: Trijenerasyon sisteminin ilk işletme giderlerinin mali değerleri

İlk işletme giderleri	Maliyet (€)	Maliyet (TL)
Yağ, soğutma suyu vb.	10.000	90.300
Çalışanlar	3.500	31.605
Sigorta	4.500	40.635
EPDK	2.000	18.060
TOPLAM	20.000	180.600

Tablo 3.9 ve tablo 3.11' de sistemlerin işletme giderlerine dahil olan yakıt masraflarına yer verilmemiştir. Yakıt masrafları ihtiyaca göre değişkenlik göstereceğinden sistemlerin çalışma planı ve ekonomik analizinde detaylı bir şekilde değerlendirilecektir.

4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

4.1. Sistemin Enerji Analizi

Sistemin enerji analizi incelenirken Termodinamiğin birinci yasası gereğince enerjinin korunumu ilkesi önemsendir [60].

$$\left[\begin{array}{c} \text{sisteme veya sistemden} \\ \text{ısı veya iş olarak} \\ \text{net enerji geçişi} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{sistemin} \\ \text{toplam enerjisindeki} \\ \text{net artış veya azalma} \end{array} \right]$$

$$Q - W = \Delta E \text{ (kJ)} \quad (4.1)$$

$$Q: \text{ sistem sınırlarından net ısı geçişini } (= \sum Q_g - \sum Q_\zeta)$$

$$W: \text{ değişik biçimleri kapsayan net işi } (= \sum W_g - \sum W_\zeta)$$

$$\Delta E: \text{ sistemdeki toplam enerji değişimi } (E_2 - E_1)$$

Yukarıdaki formüle açık sistemlerde kütle giriş ve çıkışıyla gerçekleşen enerji akışı eklenirse, denklem (4.2) gibi olur [60].

$$Q - W + \sum E_g - \sum E_\zeta = \Delta E_{KH} \text{ (kJ)} \quad (4.2)$$

$$\sum E_g: \text{ açık sisteme giren kütlelerin toplam enerjisi}$$

$$\sum E_\zeta: \text{ açık sistemden çıkan kütlelerin toplam enerjisi}$$

$$\Delta E_{KH}: \text{ açık sistemin net enerji değişimi}$$

Yapılacak enerji analizlerinde verim hesabı elde edilmek istenen değer bu değeri elde edebilmek için harcanan değere oranlanmasıyla yapılır [60].

$$\text{Verim(etkinlik)} = \frac{\text{elde edilmek istenen değer}}{\text{harcanması gereken değer}} \quad (4.3)$$

Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesine düşünülen kojenerasyon uygulamasında elektrik ihtiyacına göre seçilen 400 kW elektrik enerjisi çıktısına sahip iki adet doğalgaz ile çalışan içten yanmalı gaz motoru özellikleri göz önünde bulundurularak sistemin toplam ısı ve soğutma kapasiteleri belirlenmiştir. Enerji analizlerinde kullanılacak değerler tablo 4.1' de verilmiştir.

Tablo 4.1: Kojenerasyon sisteminin enerji değerleri

Sistem özellikleri	Kapasite (kW)
Yakıt tüketimi	2 x 945
Elektrik üretimi	2 x 400
Isı üretimi	828
İç tüketim	30

4.1.1. Sistemin Elektriksel Verimi

Sistemin elektriksel verimi, kojenerasyon uygulamasıyla elde edilen elektrik enerjinin bu enerjiyi üretebilmek için kullanılan yakıtın enerjisine oranıyla bulunur [22].

$$\eta_e = \frac{\dot{Q}_{El}}{H} \quad (4.4)$$

η_e : kojenerasyon tesisinin elektriksel verimi

\dot{Q}_{El} : kojenerasyon sisteminde üretilen elektrik miktarı (kW)

H : kojenerasyon sistemine yakıtla verilen enerji (kW)

$$\eta_e = \frac{2 \times 400}{2 \times 945} = \frac{800}{1890}$$

$$\eta_e = 0,42 \rightarrow \% 42$$

4.1.2. Sistemin Isıl Verimi

Sistemin ısı verimi, kojenerasyon uygulamasıyla elde edilen ısı enerjisinin bu enerjiyi üretebilmek için kullanılan yakıtın enerjisine oranıyla bulunur [22].

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_I}{H} \quad (4.5)$$

η_{th} : kojenerasyon tesisinin ısı verimi

\dot{Q}_I : kojenerasyon sisteminde üretilen ısı miktarı (kW)

H : kojenerasyon sistemine yakıtla verilen enerji (kW)

$$\eta_{th} = \frac{828}{2 \times 945} = \frac{828}{1890}$$

$$\eta_{th} = 0,44 \rightarrow \% 44$$

4.1.3. Sistemin Toplam Verimi

Sistemin toplam verimi yada enerjiden yararlanma oranı kojenerasyon uygulamasıyla elde edilen ısı ve elektriksel enerjinin bu enerjileri üretebilmek için kullanılan yakıtın enerjisine bölünmesiyle bulunur [22].

$$\eta_t = \frac{\dot{Q}_{El} + \dot{Q}_I}{H} \quad (4.6)$$

$$\eta_t = \eta_e + \eta_{th}$$

η_t : kojenerasyon tesisinin toplam verimi

$$\eta_t = \frac{800 + 828}{1890} = \frac{1628}{1890}$$

$$\eta_t = 0,86 \rightarrow \% 86$$

4.1.4. Sistemin Net Enerji Verimi

Sistemin net enerji verimi bir önceki denklem 4.6' ya kojenerasyon uygulamasının çalışması esnasında iç tüketim enerjisinin (genellikle elektrik) dahil edilmesiyle hesaplanır [22].

$$\eta_{net} = \frac{\dot{Q}_{EI} + \dot{Q}_I}{H + W_t} \quad (4.7)$$

η_{net} : net verim

W_t : iç tüketim enerjisi

$$\eta_{net} = \frac{800 + 828}{1890 + 30}$$

$$\eta_{net} = 0,85 \rightarrow \% 85$$

4.1.5. Sistemden Elde Edilen Enerji Tasarrufu

Birleşik ısı ve güç üretim yapan kojenerasyon tesislerinde kullanılan yakıttaki enerji ile elektriğin ve ısının ayrı ayrı üretildiği konvansiyonel sistemlerdeki harcanan enerji arasındaki fark enerji tasarrufunu başka bir ifadeyle birincil enerji tasarrufunu verir. Bu hesaplamayı yapabilmek için ayırık (konvansiyonel) sistemlerin tüketicinin elektrik ve ısı ihtiyaçlarını karşılamasında ne miktar enerji tüketeceğini belirten referans değer kavramı kullanılır. Kısacası bu değer ayırık elektriksel verim yada ayırık ısıl verim olarak da adlandırılır. Elektrik için 0,5; ısı için ise 0,9 olarak kabul gören değerler dikkate alınırsa birincil enerji tasarrufu aşağıdaki gibi hesaplanır [22].

$$PES = H_{ref} - H \text{ (kW)} \quad (4.8)$$

$$H_{ref} = H_{e,ref} + H_{th,ref} \text{ (kW)} \quad (4.9)$$

$$H_{e,ref} = \frac{Q_{EI}}{\eta_{e,ref}} (kW) \quad (4.10)$$

$$H_{th,ref} = \frac{Q_I}{\eta_{th,ref}} (kW) \quad (4.11)$$

PES: birincil enerji tasarrufu

H_{ref}: elektrik ve ısının referans tesislerde üretilmesiyle harcanan güç

H_{e,ref}: elektriğin referans tesiste üretilmesiyle harcanan güç

H_{th,ref}: ısının referans tesiste üretilmesiyle harcanan güç

η_{e,ref}: elektrik üretimi için referans etkinlik değeri

η_{th,ref}: ısı üretimi için referans etkinlik değeri

Bu denklemlere göre hastaneye kurulacak olan bir kojenerasyon tesisinde PES değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$H_{e,ref} = \frac{800kW}{0,5}$$

$$H_{e,ref} = 1600 kW$$

$$H_{th,ref} = \frac{828kW}{0,9}$$

$$H_{th,ref} = 920 kW$$

$$H_{ref} = 1600kW + 920kW$$

$$H_{ref} = 2520kW$$

$$PES = 2520 - 1890$$

$$PES = 630kW$$

4.1.6. Sistemin Çevresel Analizi

Çevresel etki genellikle yakıtın emisyon değerleriyle ilgilidir. Kojenerasyon sistemlerinde atık ısı kullanımı emisyon değerlerinin azalmasına neden olacaktır. Birincil enerji tasarrufu hesabına benzer şekilde emisyon değerlerinde referans değerler kullanılarak konvansiyonel sistemlere göre emisyon farkı belirlenir. Referans yakıt emisyon faktörü (γ_F) $0,251 \text{ kgCO}_2/\text{kW}$ değeri alınabilir [22].

$$RCES = 1 + \frac{(\gamma_{th} \times Q - \gamma_F \times H)}{\gamma_e \times W} \quad (4.12)$$

$$\gamma_{th} = \frac{\gamma_F}{\eta_{th,ref}} \quad (4.13)$$

$$\gamma_e = \frac{\gamma_F}{\eta_{e,ref}} \quad (4.14)$$

RCES: emisyon tasarrufu

γ_F : referans yakıt için CO_2 emisyonu (kgCO_2/kW)

γ_{th} : birim ısı enerjisi başına CO_2 emisyonu

γ_e : birim elektrik enerjisi başına CO_2 emisyonu

Araştırmaya konu olan kojenerasyon tesisi için *RCES* değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\gamma_{th} = \frac{0,251}{0,9} = 0,279 \text{ kgCO}_2/\text{kW}$$

$$\gamma_e = \frac{0,251}{0,5} = 0,502 \text{ kgCO}_2/\text{kW}$$

$$RCES = 1 + \frac{(0,279 \times 828 - 0,251 \times 1890)}{0,502 \times 800}$$

$$RCES = 0,39 \rightarrow \%39$$

4.2. Sistemlerin Çalıştırılma Planı

Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi' ne kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin yapılabilirliğinin araştırıldığı bu tez çalışmasında motorlar elektrik ihtiyacına göre çalıştırılması ve gün içinde hastanenin değişken elektrik taleplerine göre bazı durumlarda tek motor bazen ise her iki motorun da çalıştırılacağı düşünülmüştür. Herhangi bir arıza durumunda sıkıntı yaşanmaması için sistemin elektrik şebekesiyle paralel çalıştırılacağı düşünülmüştür. Elektrik talebine göre kurulan sistem elektrik ihtiyacını % 100 karşılayacak ve bu güç değeri için sistemin ürettiği ısı ve trijenerasyonda ısıya ek olarak soğutma kapasitesine göre hastanenin ısı gereksiniminin bir kısmı ve soğutma ihtiyacı karşılanacaktır. Motorların günde 24 saat çalıştırılmasının kullanım ömrünü azaltması gerekçesiyle 1. motorun günde 20 saat çalıştırılması düşünülmüştür. Bu takdirde diğer motorun kaç saat çalıştırılacağı ve bunun sonucunda sistem ihtiyaçlarına göre analizler yapılmıştır. Motorların çalışma saatleri belirli periyotlarda değiştirilebilir (örnek olarak 1 yıl 1. motor 1 yıl ise 2. motor çalıştırılabilir yada 1 ay 1. motor 20 saat 1 ay ise 2. motor 20 saat çalıştırılabilir) ve bu sayede motorun kullanım ömrü artması sağlanır. Ancak bu çalışmada bütün yıl boyunca 1. motorun 20 saat çalışması baz alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Soğutma üretiminin gerçekleştiği trijenerasyon sisteminin analizinin yapılabilmesi için haziran, temmuz, ağustos, eylül ve ekim aylarında sırasıyla günlük 500 kW, 1000 kW, 750 kW, 500 kW 400 kW soğutma ihtiyacına göre gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Benzer şekilde 1. motorun günlük 20 saatlik çalışmasına karşın üretilen ısı ve soğutma kapasitesine göre diğer motorun enerji taleplerini karşılaması için çalıştırılacağı saat ve diğer parametreler bulunarak çizelgelere yerleştirilmiştir. Sistemler kurulduktan sonra hastanenin net elektrik ihtiyaçları trijenerasyon ve kojenerasyon sistemlerinde farklılıklar gösterecektir. Kojenerasyon için sistemin net elektrik ihtiyacı hastanenin normal elektrik tüketim değerine tesisin iç tüketim değerinin eklenmesiyle bulunur. Hastanenin soğutma ihtiyacı normalde şebeke elektriğiyle karşılandığı için trijenerasyon sisteminde net elektrik ihtiyacı bulunurken soğutmaya harcanan elektrik toplam tüketimden çıkartılarak bulunur. Çünkü trijenerasyon sisteminde hastanenin soğutma ihtiyacının tamamı karşılanacaktır. Sistemlerin çalıştırılmasında kullanılacak bağıntılar bölüm 4.3' te verilmiştir.

4.3. Sistemlerin Çalıştırılmasına İlişkin Bağlıntılar

Sistemin planlanmasında kullanılacak bağıntılar aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \text{hastanenin aylık} \\ \text{net elektrik} \\ \text{ihtiyacı} \end{aligned} \underset{\text{koj.}}{=} \begin{aligned} \text{hastanenin aylık} \\ \text{elektrik ihtiyacı} \end{aligned} + \begin{aligned} \text{aylık} \\ \text{iç tüketim} \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \text{hastanenin aylık} \\ \text{net elektrik} \\ \text{ihtiyacı} \end{aligned} \underset{\text{tri.}}{=} \begin{aligned} \text{hastanenin aylık} \\ \text{elektrik ihtiyacı} \end{aligned} + \begin{aligned} \text{aylık} \\ \text{iç tüketim} \end{aligned} - \begin{aligned} \text{hastanenin} \\ \text{soğutma ihtiyacı} \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\text{aylık iç tüketim} = \text{ay'dakigün sayısı} \times 24 \times 30 \text{ kW} \quad (4.17)$$

$$\text{1. motorun aylık çalışma süresi} = \text{ay'dakigün sayısı} \times 20 \quad (4.18)$$

$$\text{2. motorun aylık çalışma süresi} = \frac{\left(\begin{aligned} \text{hastanenin aylık} \\ \text{net elektrik ihtiyacı} \end{aligned} - \begin{aligned} \text{1. motorun aylık} \\ \text{elektrik üretimi} \end{aligned} \right)}{400} \quad (4.19)$$

$$\text{aylık yakıt tüketimi(m}^3\text{)} = \text{aylık üretilen elektrik} \times 0,2463 \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} \text{motorların aylık} \\ \text{yakıt tüketim maliyeti} \end{aligned} = \text{aylık yakıt tüketimi(m}^3\text{)} \times 1,8954 \quad (4.21)$$

$$\text{aylık toplam elektrik üretimi} = \frac{\text{motorların aylık} \\ \text{çalışma saatleri}}{\text{çalışma saatleri}} \times 400 \text{ kW} \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} \text{aylık toplam} \\ \text{ısı enerjisi üretimi} \end{aligned} = \text{aylık toplam elektrik üretimi} \times 1,035 \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} \text{aylık toplam} \\ \text{soğutma enerjisi üreti} \end{aligned} = \text{aylık toplam elektrik üretimi} \times 0,8275 \quad (4.24)$$

$$\text{şebekeden çekilen ısı (m}^3\text{)} = \frac{\text{şebekeden çekilen ısı (kWh)}}{9,59} \quad (4.25)$$

4.4. Sistemlerin Çalıştırılması

4.4.1. Kojenerasyon Sisteminin Çalıştırılması

Sistemin faaliyete geçirilmesiyle motorların toplam çalışma saatleri, tükettikleri yakıt değerleri, üretilen ısı ve elektrik enerjileri ve maliyet değerleri tablo 4.2' de verilmiştir.

Tablo 4.2. Kojenerasyon sisteminin çalıştırılmasıyla elde edilen değerler

Aylar	Motorlar	Ortalama çalışma saatleri	Tükettikleri yakıt (m ³)	Maliyet (TL)	Üretilen elektrik enerjisi (kWh)	Üretilen ısı enerjisi (kWh)
Ocak	1.motor	620	104.620	198.296	424.767	439.634
	2.motor	441,9				
Şubat	1.motor	560	91.715	173.836	372.372	385.405
	2.motor	370,9				
Mart	1.motor	620	97.301	184.424	395.050	408.877
	2.motor	367,6				
Nisan	1.motor	600	89.598	169.824	363.777	376.509
	2.motor	309,4				
Mayıs	1.motor	620	85.306	161.688	346.352	358.474
	2.motor	245,8				
Haziran	1.motor	600	80.128	151.874	325.328	336.715
	2.motor	213,3				
Temmuz	1.motor	620	97.460	184.725	395.696	409.546
	2.motor	369,2				
Ağustos	1.motor	620	93.893	177.964	381.214	394.557
	2.motor	333,0				
Eylül	1.motor	600	75.274	142.674	305.621	316.318
	2.motor	164,1				
Ekim	1.motor	620	81.086	153.690	329.217	340.740
	2.motor	203,0				
Kasım	1.motor	600	98.390	186.488	399.471	413.453
	2.motor	398,7				
Aralık	1.motor	620	103.583	196.331	420.557	435.277
	2.motor	431,4				
TOPLAM		11.148,5	1.098.354	2.081.814	4.459.422	4.615.505

Hastaneye kojenerasyon sisteminin uygulanmasıyla aylık net elektrik ve ısıl ihtiyaçları; üretilen ısı ve elektrik enerjisi değerlerine göre karşılanamayan ısıl enerjinin miktarları (şebekeden çekilen ısı) tablo 4.3' te verilmiştir.

Tablo 4.3: Hastanenin kojenerasyon sisteminden sonra enerji ihtiyaçları ve karşılanamayan ısıl enerjisi miktarları

AYLAR	Hastanenin net elektrik ihtiyacı (kWh)	Hastanenin ısıl ihtiyacı (kWh)	Üretilen elektrik enerjisi (kWh)	Üretilen ısıl enerjisi (kWh)	Şebekeden çekilen elektrik (kWh)	Şebekeden çekilen ısıl (kWh)
Ocak	424.767	1.405.856	424.767	439.634	-	966.222
Şubat	372.372	1.098.314	372.372	385.405	-	712.909
Mart	395.050	1.044.178	395.050	408.877	-	635.301
Nisan	363.777	746.735	363.777	376.509	-	370.226
Mayıs	346.352	459.102	346.352	358.474	-	100.628
Haziran	325.328	8.219	325.328	336.715	-	0
Temmuz	395.696	1.563	395.696	409.546	-	0
Ağustos	381.214	1.688	381.214	394.557	-	0
Eylül	305.621	23.563	305.621	316.318	-	0
Ekim	329.217	43.251	329.217	340.740	-	0
Kasım	399.471	1.024.078	399.471	413.453	-	610.625
Aralık	420.557	1.586.004	420.557	435.277	-	1.150.727
TOPLAM	4.459.422	7.442.551	4.459.422	4.615.505	0	4.546.638

Doğalgaz şebekesinden karşılanamayan ısıl enerji alınarak hastanenin ısıl ihtiyacı karşılanır. Bu ısıl miktarına ait maliyet değerleri tablo 4.4' te verilmiştir.

Tablo 4.4: Kojenerasyon sisteminde şebekeden çekilen ısının maliyet değerleri

AYLAR	Şebekeden çekilen ısı (kWh)	Şebekeden çekilen ısı için tüketilen doğalgaz (m ³)	Maliyet (TL)
Ocak	966.222	100.753	190.967
Şubat	712.909	74.339	140.902
Mart	635.301	66.246	125.562
Nisan	370.226	38.605	73.171
Mayıs	100.628	10.493	19.888
Haziran	-	-	-
Temmuz	-	-	-
Ağustos	-	-	-
Eylül	-	-	-
Ekim	-	-	-
Kasım	610.625	63.673	120.685
Aralık	1.150.727	119.992	227.432
TOPLAM	4.546.638	474.101	898.607

4.4.2. Trijenerasyon Sisteminin Çalıştırılması

Sistemin faaliyete geçirilmesiyle motorların toplam çalışma saatleri, tükettikleri yakıt değerleri, üretilen ısı, elektrik, soğutma enerjileri ve bu üretim için harcanan maliyet değerleri tablo 4.5' te verilmiştir.

Tablo 4.5: Trijenerasyon sisteminin çalıştırılmasıyla elde edilen değerler

Aylar	Motorlar	Ortalama çalışma saatleri	Tüketilen yakıt (m ³)	Maliyet (TL)	Üretilen elektrik enerjisi (kWh)	Üretilen ısı enerjisi (kWh)	Üretilen soğutma enerjisi (kWh)
Ocak	1.motor	620	104.620	198.296	424.767	439.634	-
	2.motor	441,9					
Şubat	1.motor	560	91.715	173.836	372.372	385.405	-
	2.motor	370,9					
Mart	1.motor	620	97.301	184.424	395.050	408.877	-
	2.motor	367,6					
Nisan	1.motor	600	89.598	169.824	363.777	376.509	-
	2.motor	309,4					
Mayıs	1.motor	620	85.306	161.688	346.352	358.474	-
	2.motor	245,9					
Haziran	1.motor	600	76.434	144.873	310.328	8.219	250.225
	2.motor	175,8					
Temmuz	1.motor	620	89.824	170.253	364.696	1.563	300.536
	2.motor	291,7					
Ağustos	1.motor	620	88.166	167.110	357.964	1.688	294.866
	2.motor	274,9					
Eylül	1.motor	600	71.580	135.672	290.621	23.563	221.650
	2.motor	126,6					
Ekim	1.motor	620	78.031	147.900	316.814	43.251	227.584
	2.motor	172,0					
Kasım	1.motor	600	98.390	186.488	399.471	413.453	-
	2.motor	398,7					
Aralık	1.motor	620	103.583	196.331	420.557	435.277	-
	2.motor	431,4					
TOPLAM		10.906,9	1.074.548	2.036.695	4.362.769	2.895.913	1.294.861

Hastaneye kojenerasyon sisteminin uygulanmasıyla aylık net elektrik, ısı ve soğutma ihtiyaçları; üretilen ısı, elektrik ve soğutma enerjisi değerlerine göre karşılanamayan ısı enerjisinin miktarları (şebekeden çekilen ısı) tablo 4.6' da verilmiştir.

Tablo 4.6: Hastanenin trijenerasyon sisteminden sonra enerji ihtiyaçları ve karşılanamayan ısı enerjisi miktarları

AYLAR	Hastanenin net elektrik ihtiyacı (kWh)	Hastanenin ısı ihtiyacı (kWh)	Hastanenin soğutma ihtiyacı (kWh)	Üretilen elektrik enerjisi (kWh)	Üretilen ısı enerjisi (kWh)	Üretilen soğutma enerjisi (kWh)	Şebekeden çekilen elektrik (kWh)	Şebekeden çekilen ısı (kWh)
Ocak	424.767	1.405.856	-	424.767	439.634	-	-	966.222
Şubat	372.372	1.098.314	-	372.372	385.405	-	-	712.909
Mart	395.050	1.044.178	-	395.050	408.877	-	-	635.301
Nisan	363.777	746.735	-	363.777	376.509	-	-	370.226
Mayıs	346.352	459.102	-	346.352	358.474	-	-	100.628
Haziran	310.328	8.219	15000	310.328	8.219	250.225	-	-
Temmuz	364.696	1.563	31000	364.696	1.563	300.536	-	-
Ağustos	357.964	1.688	23250	357.964	1.688	294.866	-	-
Eylül	290.621	23.563	15000	290.621	23.563	221.650	-	-
Ekim	316.814	43.251	12400	316.814	43.251	227.584	-	-
Kasım	399.471	1.024.078	-	399.471	413.453	-	-	610.625
Aralık	420.557	1.586.004	-	420.557	435.277	-	-	1.150.727
TOPLAM	4.362.769	7.442.551	96.650	4.362.769	2.895.913	1.294.861		4.546.638

Doğalgaz şebekesinden karşılanamayan ısı enerjisi alınarak hastanenin ısı enerjisi ihtiyacı karşılanır. Bu ısı miktarına ait maliyet değerleri tablo 4.7' de verilmiştir.

Tablo 4.7: Trijenerasyon sisteminde şebekeden çekilen ısının maliyet değerleri

AYLAR	Şebekeden çekilen ısı (kWh)	Şebekeden çekilen ısı için tüketilen doğalgaz (m³)	Maliyet (TL)
Ocak	966.222	100.753	190.967
Şubat	712.909	74.339	140.902
Mart	635.301	66.246	125.562
Nisan	370.226	38.605	73.171
Mayıs	100.628	10.493	19.888
Haziran	-	-	-
Temmuz	-	-	-
Ağustos	-	-	-
Eylül	-	-	-
Ekim	-	-	-
Kasım	610.625	63.673	120.685
Aralık	1.150.727	119.992	227.432
TOPLAM	4.546.638	474.101	898.607

4.5. Sistemlerin Ekonomik Analizi

Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesinin enerji talebinin giderilmesinde önerilecek olan kojenerasyon ve trijenerasyon sistemine ait ekonomik analiz için amortisman fiyatı, statik ve dinamik geri ödeme süreleri gibi parametreler hesaplanacaktır. Sistemlerin ekonomik analizinde kullanılacak bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$\text{Aylık net kazanç} = \left(\begin{array}{c} \text{sistemden önce} \\ \text{aylık enerji maliyeti} \end{array} - \begin{array}{c} \text{sistemden sonra} \\ \text{aylık enerji maliyeti} \end{array} \right) \quad (4.26)$$

$$\text{Sistemden önce aylık enerji maliyeti} = \left(\begin{array}{c} \text{aylık elektrik} \\ \text{maliyeti} \end{array} + \begin{array}{c} \text{aylık ısınma} \\ \text{maliyeti} \end{array} \right) \quad (4.27)$$

$$\text{Sistemden sonra aylık enerji maliyeti} = \left(\begin{array}{c} \text{elektrik} \\ \text{üretimi} \\ \text{için harcanan} \\ \text{doğalgaz} \\ \text{maliyeti} \end{array} + \begin{array}{c} \text{sistem} \\ \text{tarafından} \\ \text{karşılanamayan} \\ \text{ısınma} \\ \text{maliyeti} \end{array} + \begin{array}{c} \text{bakım ve} \\ \text{işletme} \\ \text{maliyeti} \end{array} \right) \quad (4.28)$$

$$\text{bakım ve işletme maliyeti}_{\text{kojenerasyon}} = 6 \text{ euro/saat} = 54,18 \text{ TL/saat}$$

$$\text{bakım ve işletme maliyeti}_{\text{trijenerasyon}} = 7 \text{ euro/saat} = 65,1 \text{ TL/saat}$$

4.5.1. Kojenerasyon Sisteminin Ekonomik Analizi

Aylara göre kojenerasyon sisteminin elektrik ve ısınma harcamalarından motorun yakıt, karşılanamayan ısınma ve bakım-işletme maliyeti çıkartılarak net kazanç bulunur. Bu değerler tablo 4.8' de verilmiştir.

Tablo 4.8: Kojenerasyon sistemi öncesi ve sonrasına ait aylık giderler ve net kar değerleri

AYLAR	Sistemden önceki maliyet (TL)		Sistemden sonraki maliyet (TL)			NET KAR (TL)
	Aylık elektrik maliyeti	Aylık ısınma maliyeti	Motorun harcadığı doğalgaz maliyeti	Sistemin karşılamadığı ısınma maliyeti	Bakım ve işletme maliyeti	
Ocak	348.358	277.858	198.296	190.967	40.310	196.643
Şubat	304.875	217.075	173.836	140.902	36.409	170.803
Mart	322.635	206.375	184.424	125.562	40.310	178.714
Nisan	296.188	147.587	169.824	73.171	39.010	161.770
Mayıs	281.105	90.739	161.688	19.888	40.310	149.958
Haziran	262.907	1.624	151.874	-	39.010	73.647
Temmuz	323.186	309	184.725	-	40.310	98.460
Ağustos	310.659	334	177.964	-	40.310	92.719
Eylül	245.849	4.657	142.674	-	39.010	68.822
Ekim	265.650	8.548	153.690	-	40.310	80.198
Kasım	327.085	202.402	186.488	120.685	39.010	183.304
Aralık	344.714	313.463	196.331	227.432	40.310	194.104
TOPLAM	5.104.182		3.455.040			1.649.142

Yıllık amortisman bedeli,

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

$$I = 3828720 \text{ TL}$$

$$f = \%9,25 = 0,0925$$

$$n = 20 \text{ yıl}$$

$$C_K = 3828720 \text{ TL} \left[\frac{0,0925 \times (1 + 0,0925)^{20}}{(1 + 0,0925)^{20} - 1} \right] \left(\frac{TL}{\text{yıl}} \right)$$

$$C_K = 426921 \text{ TL/yıl},$$

Dinamik geri ödeme süresi,

$$t_D = \frac{\ln \left\{ \frac{G_i}{G_i - G_y \times f} \right\}}{\ln(1 + f)} \text{ (yıl)}$$

$$G_i = 1649142 \text{ TL}$$

$$G_y = 3973200 \text{ TL}$$

$$t_D = \frac{\ln \left\{ \frac{1649142}{1649142 - 3973200 \times 0,0925} \right\}}{\ln(1 + 0,0925)}$$

$$t_D = 2,85 \text{ yıl},$$

Statik geri ödeme süresi,

$$t_S = \frac{G_y}{G_i} \text{ (yıl)}$$

$$t_S = \frac{3973200}{1649142}$$

$$t_S = 2,41 \text{ yıl} \text{ olarak hesaplanır.}$$

4.5.2. Trijenerasyon Sisteminin Ekonomik Analizi

Aylara göre trijenerasyon sisteminin elektrik ve ısınma harcamalarından motorun yakıt, karşılanamayan ısınma ve bakım-işletme maliyeti çıkartılarak net kazanç bulunur. Bu değerler tablo 4.9' da verilmiştir.

Tablo 4.9: Trijenerasyon sistemi öncesi ve sonrasına ait aylık giderler ve net kar değerleri

AYLAR	Sistemden önceki		Sistemden sonraki			NET KAR (TL)
	maliyet (TL)		maliyet (TL)			
	Aylık elektrik maliyeti	Aylık ısınma maliyeti	Motorun harcadığı doğalgaz maliyeti	Sistemin karşılamadığı ısınma maliyeti	Bakım ve işletme maliyeti	
Ocak	348.358	277.858	198.296	190.967	40.310	196.643
Şubat	304.875	217.075	173.836	140.902	36.409	170.803
Mart	322.635	206.375	184.424	125.562	40.310	178.714
Nisan	296.188	147.587	169.824	73.171	39.010	161.770
Mayıs	281.105	90.739	161.688	19.888	40.310	149.958
Haziran	262.907	1.624	144.873	-	45.511	74.147
Temmuz	323.186	309	170.253	-	47.028	106.214
Ağustos	310.659	334	167.110	-	47.028	96.855
Eylül	245.849	4.657	135.672	-	45.511	69.323
Ekim	265.650	8.548	147.900	-	47.028	79.270
Kasım	327.085	202.402	186.488	120.685	39.010	183.304
Aralık	344.714	313.463	196.331	227.432	40.310	194.104
TOPLAM	5.104.182		3.443.077			1.661.105

Yıllık amortisman bedeli;

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

$$I = 5.011.650 \text{ TL}$$

$$f = \%9,25 = 0,0925$$

$$n = 20 \text{ yıl}$$

$$C_K = 5.011.650 \text{ TL} \left[\frac{0,0925 \times (1 + 0,0925)^{20}}{(1 + 0,0925)^{20} - 1} \right] \left(\frac{TL}{\text{yıl}} \right)$$

$$C_K = 558.823 \text{ TL/yıl},$$

Dinamik geri ödeme süresi,

$$t_D = \frac{\ln \left\{ \frac{G_i}{G_i - G_y \times f} \right\}}{\ln(1 + f)} \text{ (yıl)}$$

$$G_i = 1.661.105 \text{ TL}$$

$$G_y = 5.192.250 \text{ TL}$$

$$t_D = \frac{\ln \left\{ \frac{1661105}{1661105 - 5192250 \times 0,0925} \right\}}{\ln(1 + 0,0925)}$$

$$t_D = 3,86 \text{ yıl},$$

Statik geri ödeme süresi,

$$t_S = \frac{G_y}{G_i} \text{ (yıl)}$$

$$t_S = \frac{5.192.250}{1.661.105}$$

$$t_S = 3,13 \text{ yıl olarak bulunur.}$$

5. SONUÇ

Dünya genelinde hemen hemen bütün sektörlerde gerekli olan enerji kavramı gün geçtikçe daha önemli ve kritik bir konu haline gelmektedir. Artan nüfus, gelişen teknoloji ve sürdürülebilir yaşam gibi faktörler sebebiyle enerji gereksinimi istikrarlı bir şekilde artmaya devam etmektedir. Bu artış özellikle ülkelerin gelişmişlik düzeyleriyle de orantılı olmaktadır. 21. yüzyıl dünyasında ve gelecek yüzyılda enerji kavramının daha da önemli bir konuma geleceği araştırmacılar tarafından kesin gözüyle bakılmaktadır. Geçmişten günümüze enerji üretiminde büyük bir yer edinen fosil kaynakların tükenecek olması, çevreye verdikleri zarar, ekonomik olmayışları araştırmacılarca yeni alternatiflerin değerlendirilmesi hususunda ısrar edilmektedir. Enerjinin daha verimli bir şekilde kullanıldığı alternatiflerden olan "Birleşik ısı ve güç teknolojileri" bu tez çalışmasının konusunu oluşturmuştur.

Bu çalışmada Kars ilinde bulunan Kafkas Üniversitesine bağlı, bulunan Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi' nin enerji gereksiniminin sağlanmasında birleşik ısı ve güç teknolojilerinden kojenerasyon ve trijenerasyon uygulamalarının hem enerji hem de ekonomik anlamda analizi yapılarak sistemlerin fizibilitesi yapılmış ve bu teknolojiler mukayese edilerek hangisinin hastaneye daha uygun olabileceği araştırılmıştır. Çalışmaya konu olan toplam 276 yataklı ve 51.962 m² toplam alana sahip hastanenin 2019 yılı elektrik ve doğalgaz tüketimleri dikkate alınarak yıllık enerji ihtiyaçları belirlenmiş ve bu talebe göre sistem seçimi yapılmıştır.

Sistem seçiminde 2019 yılı aylık elektrik ve doğalgaz harcama giderlerine göre sistemin itici gücünü oluşturan ana taşıyıcı ve kapasitesi belirlenmiştir. Bu belirlemede, doğalgaz tüketimlerinin yıl içinde dalgalanma göstermesi, elektrik tüketiminin daha stabil seyretmesi ve elektrik fiyatlandırılmasının daha pahalı olması gerekçesiyle planlanan sistemlerin elektrik giderlerine göre yapılacağının daha isabetli olması etkili olmuştur.

1 kWh elektrik → 0,8656 TL (şebeke elektriğinin birim fiyatı)

1 kWh elektrik → 0,2463 m³ doğalgaz → 0,4594 TL (gaz motorunda elektrik birim fiyatı)

Normal şebeke elektrik fiyatlandırmasının pahalı olmasından dolayı elektrik tüketimlerine göre sistem seçimi elektriğin en fazla harcandığı ocak ayında göre ortalama gidere göre ve hastane gibi birimlerde gün için yaşanan harcama dalgalanmaları da göz önünde bulundurularak 800 kW'lık kapasitenin uygun olacağı belirlenmiştir. Motorların düşük yükte verimlerinin düşmesi, tek motorun herhangi bir arıza anında sistemi zora sokması, bakım ve işletim kolaylığı gibi sebeplerden ötürü 800 kW'lık elektrik çıktısı 2 adet 400 kW'lık doğalgaz ile çalışan gaz motoruyla sağlanmasının daha avantajlı olacağı düşünülmüştür.

Motorların teknik özelliklerine ve bazı kabullere göre sistemlerin elektrik, ısıtma ve soğutma güçleri hesaplanmıştır. Aynı zamanda bulunan bu değerlere göre tek bir motorun ürettiği enerji değerleri ve motorların 1 kW'lık elektrik üretimlerinde ortaya çıkan ısı ve soğutma güçleri bulunmuştur. Bu değerler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

$$\dot{Q}_E = 800 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_I = 828 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_S = 662 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{tek motor,elektrik}} = 400 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{tek motor,ısıtma}} = 414 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{tek motor,soğutma}} = 331 \text{ kW}$$

$$1 \text{ kW'lık elektrik üretimine karşı} \rightarrow \frac{414 \text{ kW}}{400 \text{ kW}} \rightarrow 1,035 \text{ kW'lık ısı üretimi}$$

$$1 \text{ kW'lık elektrik üretimine karşı} \rightarrow \frac{331 \text{ kW}}{400 \text{ kW}} \rightarrow 0,8275 \text{ kW'lık soğutma üretimi}$$

Kojenerasyon sistemine ait yapılan enerji analizlerinde ise sistemin elektriksel, ısı, toplam ve net verimleri bulunmuştur. Sistemin hayata geçirilmesiyle birincil enerji tüketiminde tasarruf sağlanacak ve bu tasarrufa göre emisyon değerlerinde doğal olarak bir azalma meydana gelecektir. % 39' luk CO₂ emisyon oranı azalması ciddi bir rakam olup gelecek için birleşik ısı ve güç sistemlerini ilgi çekici hale getirmektedir. % 39

sayısı enerjinin ayrık üretildiği sistemlerde ortalama 100 kg olan CO₂ yayılım miktarını 61 kg değerine düşüreceği anlamına gelir. Bu yüzden kojenerasyon sistemi hem ekonomik hem de çevresel olarak konvansiyonel sistem olan ayrık üretimden daha avantajlı olacaktır. Bu değerler ise aşağıdaki gibidir.

$$\eta_e = 0,42 \rightarrow \% 42$$

$$\eta_{th} = 0,44 \rightarrow \% 44$$

$$\eta_t = 0,86 \rightarrow \% 86$$

$$\eta_{net} = 0,85 \rightarrow \% 85$$

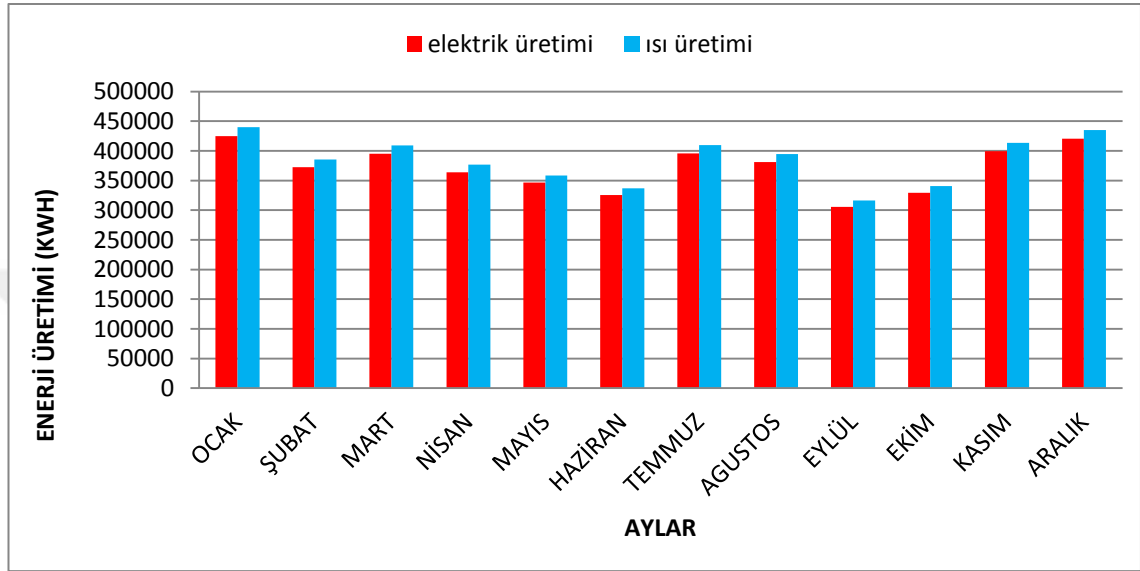
$$PES = 630kW$$

$$RCES = 0,39 \rightarrow \%39$$

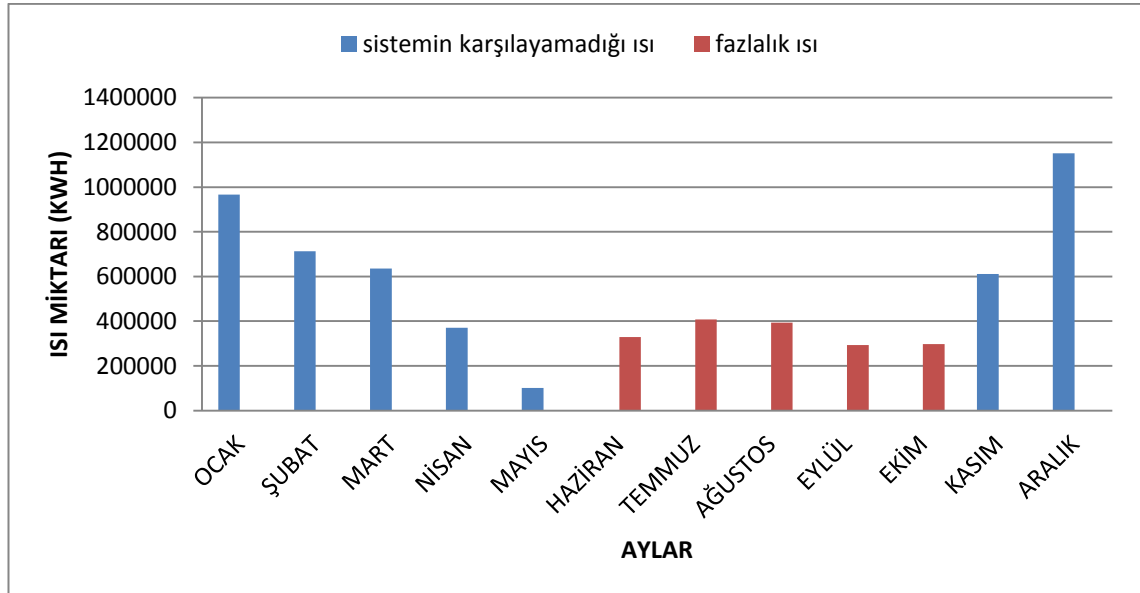
Hastanenin yıllık ısı enerji ihtiyacı iklimsel özelliklerden dolayı elektrik ihtiyacından daha fazladır. Bu nedenle her iki sistemin çalışması planlanırken sistem elektrik tüketiminin tamamının karşılanacağı şekilde tasarlama yapılarak bu üretim sonunda açığa çıkan ısı ile de ısı ihtiyacın karşılanması ve karşılanamayan miktarın ise şebekeden alınması şeklinde düşünülmüştür. 2019 yılında toplam 4.197.332 kWh elektrik enerjisi ve 776.074 m³ doğalgaz yani 7.442.551 kWh ısı enerji harcanmıştır. Bu harcamalara göre elektrik için 3.633.211 TL ve doğalgaz için ise 1.470.971 TL ödenmiştir.

Kojenerasyon sistemi analizlerinde sistemin iç tüketiminden dolayı yıllık elektrik enerjisi ihtiyacı 4.459.422 kWh olarak hesaplanmıştır. Isıl ihtiyaç ise aynı olup 7.442.551 kWh olarak alınmıştır. Sistemin tahrik gücünü oluşturan 1. motor yıllık toplam 7.300 saat 2. motor ise toplamda 3.849 saat çalışarak toplamda 4.459.422 kWh elektrik enerjisi, 4.615.505 kWh ise ısı enerji üretilmiştir. Ancak haziran, temmuz, ağustos, eylül ve ekim aylarında üretilen ısı enerjinin büyük bir kısmı kullanılmayacaktır. Bu değerlere göre elektriğin tamamı sistem tarafından karşılanmış ısı enerjinin ise 4.546.638 kWh karşılanamayıp şebekeden alınmıştır. Sistemin hastanenin elektrik enerjisini karşılama oranı % 100; ısı güç karşılama oranı ise % 39

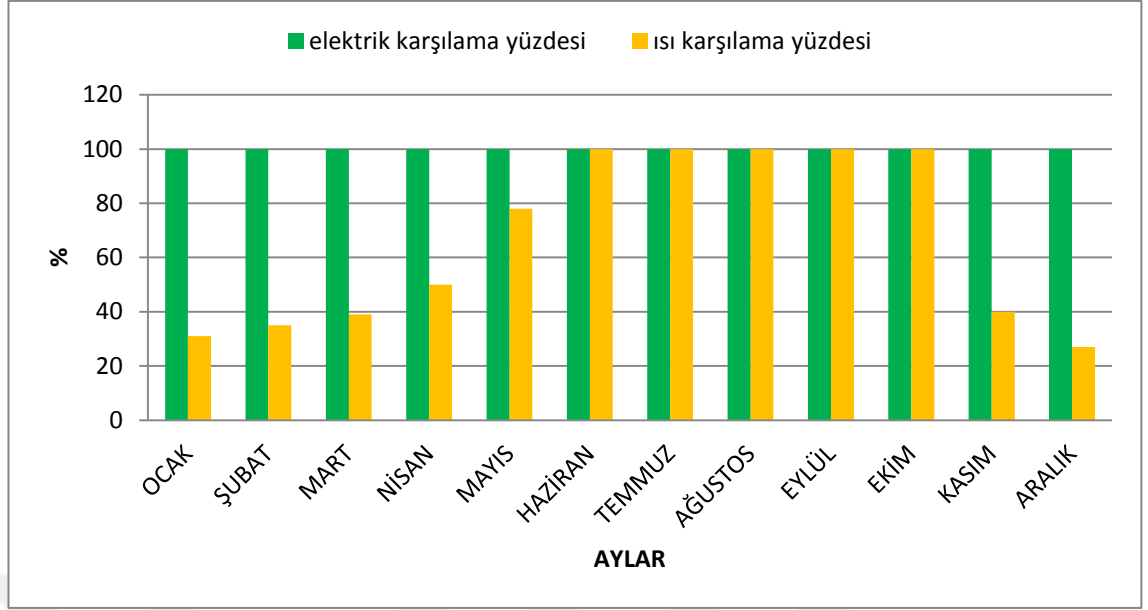
olup kojenerasyon sistemi tarafınca karşılanacaktır. Hastanenin enerji ihtiyacının ise toplamda % 62' si sistem tarafından karşılanacaktır. Aylara göre kojenerasyon sistemi tarafından üretilen enerji miktarları şekil 5.1'de, sistemin karşılayamadığı ısı ve fazla üretilen ısı şekil 5.2' de, bu enerjilerin hastanenin ihtiyacını karşılama oranları ise şekil 5.3' te verilmiştir.



Şekil 5.1: Kojenerasyon sistemiyle aylara göre üretilen enerji miktarları



Şekil 5.2: Kojenerasyon sistemiyle aylara göre karşılanamayan ve fazlalık ısı enerjisi miktarları

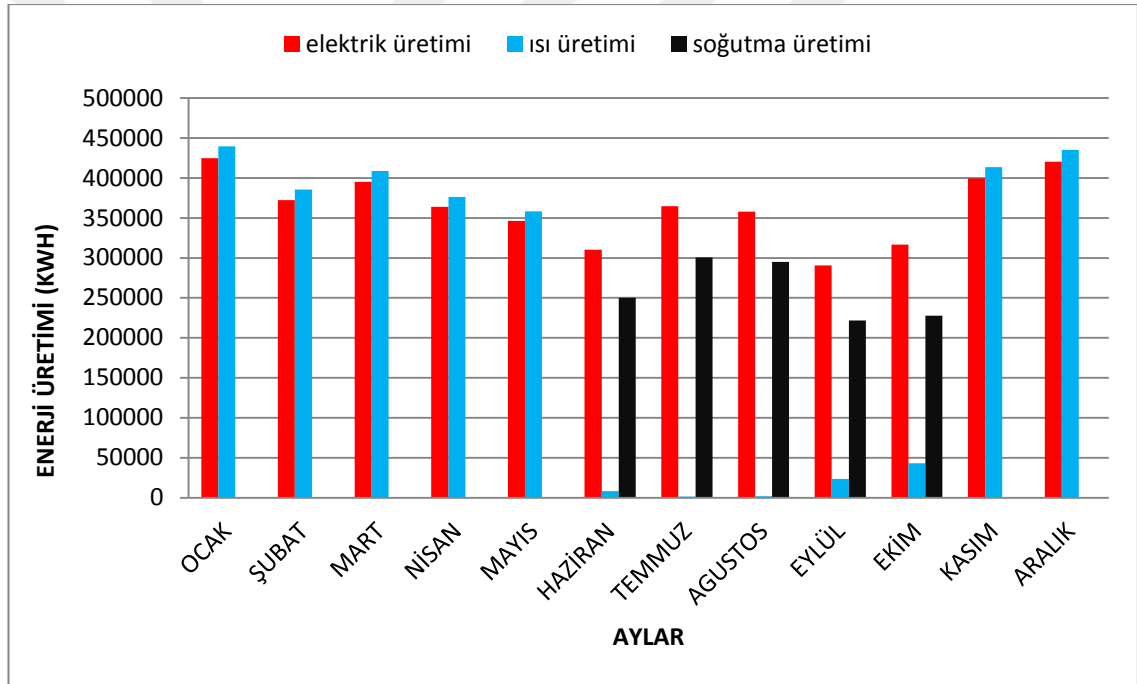


Şekil 5.3: Kojenerasyon sistemiyle aylara göre hastanenin elektrik ve ısı enerji ihtiyaçlarını karşılama yüzdeleri

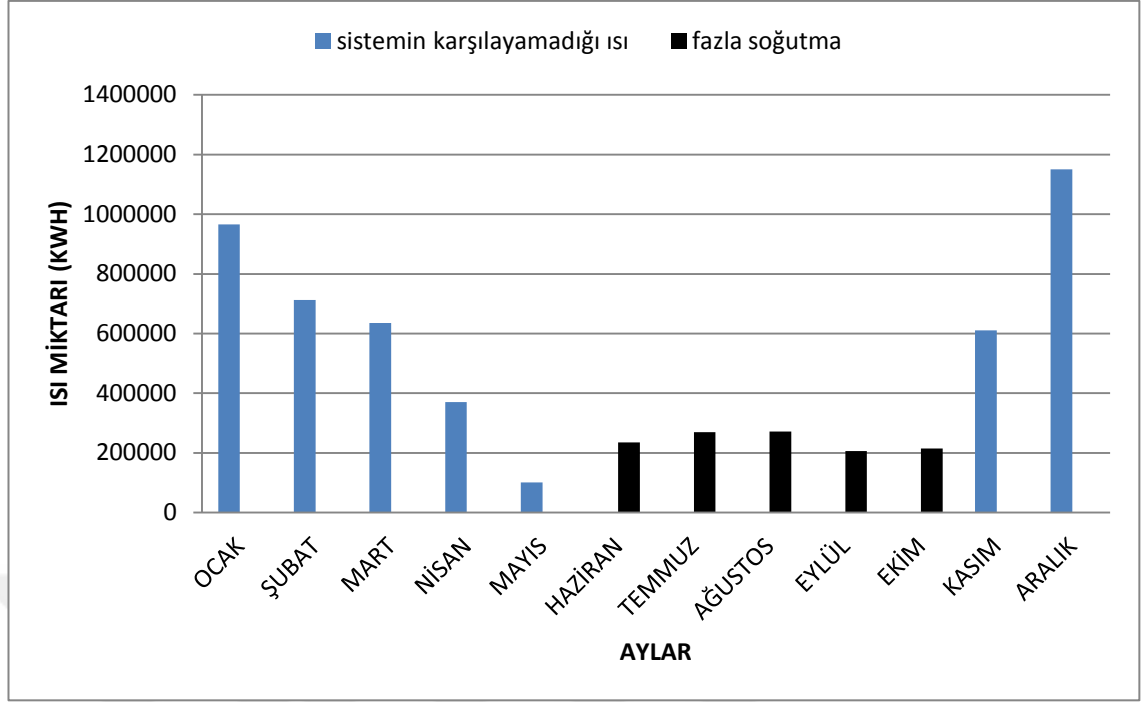
Trijenerasyon sistemi analizlerinde ise yine iç tüketimden dolayı ve haziran, temmuz, ağustos, eylül, ekim aylarında elektrikle çalışan chiller soğutma gruplarının tüketimleri toplam ihtiyaçtan çıkartılarak hastanenin yıllık net elektrik ihtiyacı 4.362.769 kWh olarak bulunmuştur. Isıl ihtiyaç ise yine aynı değerde olup 7.442.551 kWh' tır. Hastanenin soğuma ihtiyacı sadece haziran, temmuz, ağustos, eylül ve ekim aylarında olup toplamda 96.650 kWh' tir. Trijenerasyon sisteminde 1. motor yıllık toplam 7.300 saat 2. motor ise toplamda 3.607 saat çalışarak toplamda 4.362.769 kWh elektrik enerjisi, 2.895.913 kWh ısıl enerji ve 1.294.861 kWh soğutma gücü üretilebilir. Üretilen ısı gücü direkt hastanenin ısıl ihtiyacına göre alınmış olup fazlalık enerjinin tamamının soğutma gücü üretimi için harcanacağı kabul edilmiştir. Bu değerlere göre hastanenin elektrik ve soğutma gücü talebinin tamamı sistem tarafından karşılanmakta olup ısıl enerjinin ise 4.546.638 kWh kadarı sistem tarafından karşılanmayıp şebekeden çekilecektir. Yani elektrik ve soğutma gereksiniminin % 100' ü, ısıl ihtiyacın ise % 39' u trijenerasyon sistemince giderilecektir. Hastane enerji ihtiyacının ise toplamda % 62' si sistem tarafınca karşılanacaktır. Her iki sistem için geçerli olan yaklaşık % 62' lik toplam enerjiyi karşılama oranının daha fazla olmamasının nedenleri arasında; sistemin elektrik ihtiyacının baz olarak alınması, iklimsel özelliklerden dolayı kışın doğalgaz tüketimindeki fazlalık ve yaz aylarındaki üretilen ısı enerjisi veya soğutma

enerjisi fazlalığı gösterilebilir. Sistem olarak doğalgazlı motor tahrikli elektriğin büyük bir kısmını karşılayan çalışmalarda bu oranın bu civarlarda olduğu; şebekeyle paralel çalıştırılan çalışmalarda veya farklı tahrikli taşıyıcı sistemlerde ise ısı ve elektrik ihtiyacı ortak düşünülüp üretilen fazla elektrik şebekeye satılabileceği için toplam enerji karşılama yüzdesi daha yüksek değerlerdedir.

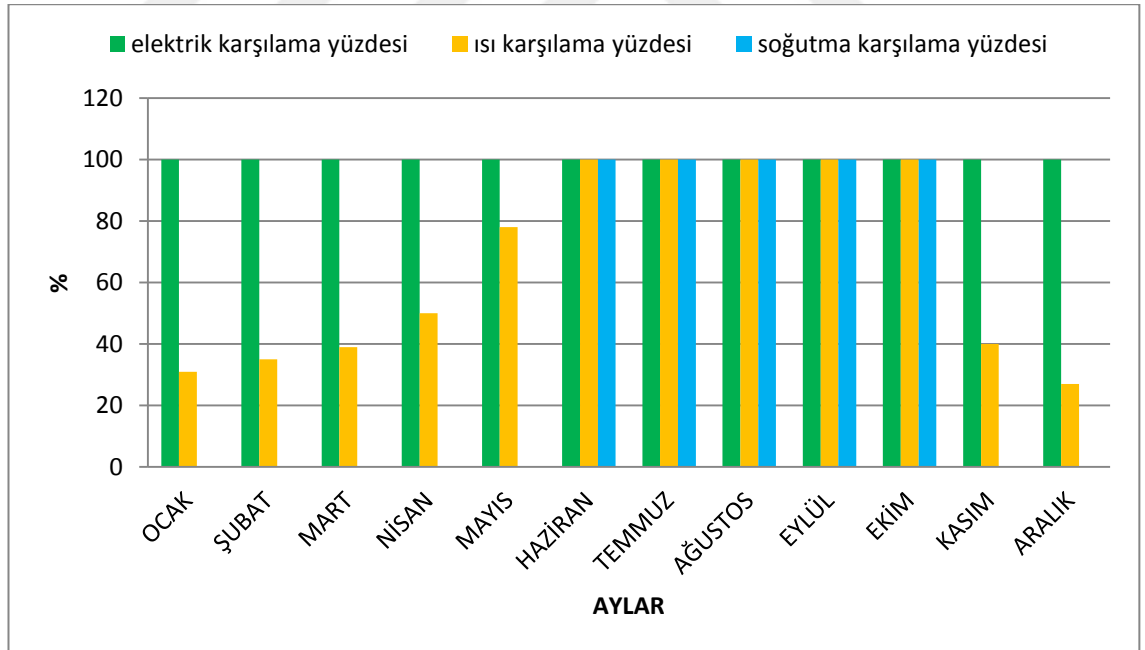
Havanın sıcak olduğu belirtilen aylarda ise meydana gelen enerji fazlalığının tamamı soğutma gücüne harcandığı varsayılırsa 1.198.211 kWh soğutma gücü fazlalığı oluşacaktır. Aylara göre trijenerasyon sistemi tarafından üretilen enerji miktarları şekil 5.4' te, sistemin karşılayamadığı ısı ve fazla üretilen soğutma gücü şekil 5.5' te ve bu enerjilerin hastanenin enerji ihtiyaçlarını karşılama oranı şekil 5.6' da verilmiştir.



Şekil 5.4: Trijenerasyon sistemiyle aylara göre üretilen enerji miktarları



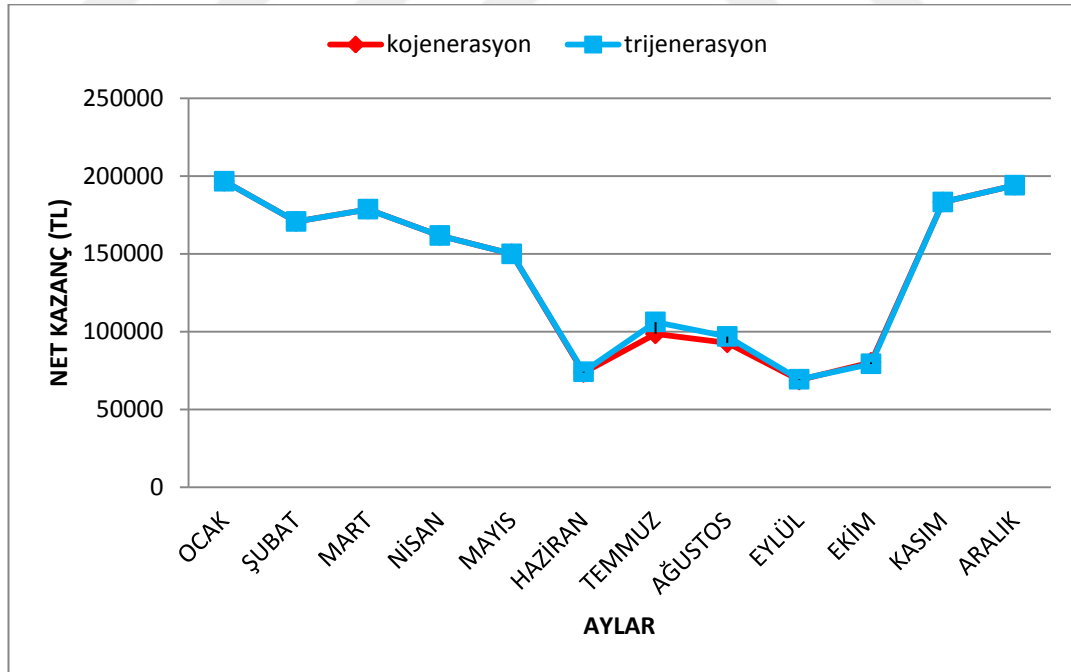
Şekil 5.5: Trijenerasyon sistemiyle aylara göre karşılanamayan ısı enerjisi ve fazlalık soğutma enerjisi miktarları



Şekil 5.6: Trijenerasyon sistemiyle aylara göre hastanenin elektrik, ısı ve soğutma enerji ihtiyaçlarını karşılama yüzdeleri

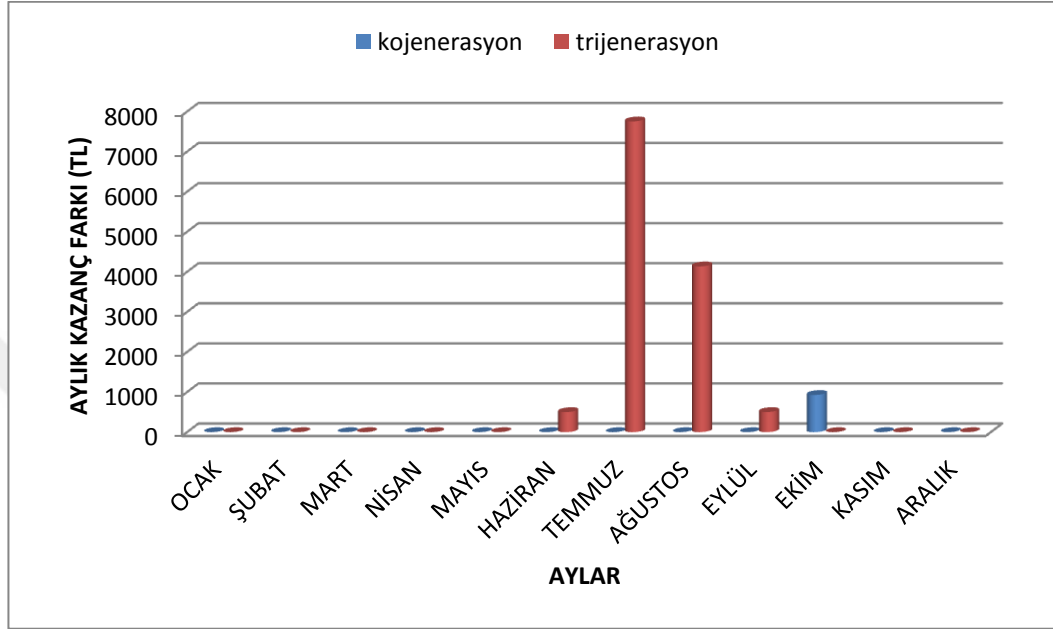
Kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin hangisine karar verilmesinde en belirleyici faktörlerin başında ekonomik değerler gelir. Yapılmasının araştırıldığı kojenerasyon ve

trijenerasyon uygulamalarının ekonomik analizinde aylık net kazanç değerleri bulunmuş ve yıllık amortisman değeri, statik ve dinamik geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. Aylık net kazanç, sistemden önceki giderler ve sistemlerden sonraki giderler arasındaki fark hesaplanarak bulunmuştur. Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi, 2019 yılı verilerine göre yıllık 3.633.211 TL elektrik için, 1.470.971 TL ise doğalgaz için ödeyerek hastanenin yıllık toplam enerji maliyeti 5.104.182 TL' dir. Sistemlerin kurulumundan sonra ödenecek giderler, motorların doğalgaz tüketimleri, karşılanamayan ısıl ihtiyaçlar için doğalgaz harcamaları ve tesislerin üretim esnasındaki bakım ve işletme maliyetleri olacaktır. Gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra kojenerasyon tesisinden önceki 5.104.182 TL' lik gider sistemden sonra 3.455.040 TL' ye gerilemiştir. Yani kojenerasyon sisteminden elde edilebilecek olan yıllık net kazanç 1.649.142 TL' dir. Trijenerasyon sisteminde ise yıllık gider 3.443.077 TL olup yıllık net kazanç 1.661.105 TL'dir. Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi için trijenerasyon sistemi yıllık 11.963 TL gibi az farkla kojenerasyondan net kazanç olarak üstün çıkmıştır. Sistemlerin aylık net kazançları şekil 5.7' deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5.7: Sistemlerle elde edilen aylık net kazançlar

Tablo 3.8 ve tablo 3.9' da görüldüğü üzere kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerine ait net kazançlar doğal olarak absorpsiyonlu soğutucunun devreye girdiği haziran, temmuz, ağustos, eylül ve ekim aylarında farklı çıkmıştır. Bu aylarda bir sistemin diğerinden olan kazanç farkı şekil 5.8' deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5.8: Aylara göre net kazanç farkı

Sistemlerin ekonomik olarak incelenmesinde yaygın kullanılan yıllık amortisman bedeli, dinamik ve statik geri ödeme süreleri hesaplanarak kojenerasyon ve trijenerasyon sistemleri karşılaştırılmıştır. Kojenerasyon teknolojisinin Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi' ne uygulanmasıyla yaklaşık olarak yıllık amortisman 429.921 TL; statik geri ödeme süresi 2,41 yıl; dinamik geri ödeme süresi ise 2,85 yıl olarak hesaplanmıştır. Trijenerasyon sisteminde ise yıllık amortisman 558.823 TL; statik geri ödeme süresi 3,13 yıl; dinamik geri ödeme süresi ise 3,86 yıl olarak hesaplanmıştır. Yapılan kaynak taramasında dinamik geri ödeme süresinin 1,35 yıl ile 5,86 yıl arasında değişkenlik gösterebileceği görülmüştür [65,73]. Bu tez çalışmasında hem kojenerasyon hem de trijenerasyon için bulunan değerler sistemlerin yapılabilirliği açısından avantajlı sayılabilecek niceliktedir. Literatürel bilgiler ve yapılan araştırmaların açıklamalarında belirtildiği gibi bu çalışma sonucunda da hem kojenerasyon hem de trijenerasyon uygulamalarının avantajı kanıtlanmıştır.

Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi'ne hangi sistemin daha uygun olacağı hususunda ise kojenerasyon sistemlerinin daha avantajlı ve ekonomik olacağı söylenebilir. Çünkü gerek yıllık amortisman bedeli, gerekse geri ödeme süreleri yönünden kojenerasyon daha başarılı sonuçlar vermiştir. Isı ve elektrik üretimine ek olarak soğutma tahsisi sağlayan trijenerasyon sistemleri Kars iklim şartlarındaki bir hastaneye, tüketici yapının soğutma ihtiyacının az olması, trijenerasyon teknolojilerinin kojenerasyon teknolojilerine göre ilk yatırım masraflarının daha fazla olması, trijenerasyon sisteminin geri dönüş sürelerinin uzunluğu gibi sebepler nedeniyle uygun olmayacaktır. Trijenerasyon sistemleri kojenerasyon sistemlerine göre yıllık toplamda 11.963 TL daha fazla kazanç sağlamıştır. Ancak tesislerin kurulumunda trijenerasyon sistemine ödenecek ek 1.219.050 TL yatırım masrafı bu kazancı gölgeleyecek büyüklüktedir.

Kojenerasyon sistemiyle yaz aylarında oluşacak ısı fazlalığı sistemin geri ödeme süresini uzatmakla beraber toplam veriminin azalmasına neden olabilir. Bu olumsuzluğu önlemek için tüketici yapının diğer bölümlerine ısı dağıtımı yada fazla ısı, kojenerasyon sistemlerine termal enerji depolama sistemlerinin entegrasyonu ile daha sonra kullanılabilir hale getirilebilir. Termal enerji sistemleri özellikle elektrik ve ısı ihtiyacının orantısız şekilde olduğu yapılarda avantajlı bir seçenektir.

Sonuç olarak elektrik ve ısı gibi önemli enerjilere sürekli ve yüksek talebi olan hastane gibi tüketici birimlere birçok araştırmacı tarafından güvenilir etiketi yapılandırılan "Birleşik enerji üretim" yöntemleri çevresel, ekonomik ve enerji tasarrufu anlamında konvansiyonel sisteme göre bir hayli avantajlı olmakla birlikte Kars gibi soğutma ihtiyacı fazla olmayan yerlerde ise bu yöntemlerde kojenerasyon uygulamalarının daha da avantajlı olduğunu söyleyebiliriz. Ancak soğutma ihtiyacının fazla ve düzenli olduğu hastaneler ve / veya yapılar için ise trijenerasyon teknolojileri daha avantajlı olabilecektir. Dünya genelinde "Birleşik üretim" politikalarının, senaryolarının ve kullanım oranlarının az olmasından dolayı gelecek için ülkeler enerji senaryolarında sürdürülebilirlik açısından kojenerasyon ve trijenerasyon gibi teknolojilere yer vermeleri gerekmektedir.

6. KAYNAKÇA

1. Hakeem, P.M.H.,(2017). Irak' ta bulunan Bir Toplu Konut Projesi İçin Solar Enerji Destekli Trijenerasyon Sistem Tasarım ve Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. p. 72.Isparta.
2. Avdar, R.,(2020). Yenilenemeyen Enerji Kaynakları Piyasasının Çoklu Regresyon Yöntemi İle Analizi; Türkiye Doğalgaz Piyasası Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. p. 115.Karabük.
3. Koç, A., et al.,(2018). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi. 59(692): p. 86-114.
4. Kısakesen, T.,(2016). KSÜ Sağlık Uygulama ve Araştırma Hastanesinin Enerji İhtiyacının Karşılansında Kojenerasyon ve Trijenerasyon Sistemlerinin Karşılaştırılması ve Ekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. p. 117. Kahramanmaraş.
5. <https://www.dunyaenerji.org.tr/bp-enerji-gorunumu-2018/>. 2018.
6. Ballı, Ö.,(2008). Kojenerasyon Sistemlerinin Enerji, Kullanılabilirlik (Ekserji) ve Ekserjiekonomik Analiz Yöntemleri Kullanılarak Performansının Değerlendirilmesi. Doktora tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Eskişehir.
7. Gün, R.,(2009). Kojenerasyon Sistemlerinin Ekonomik Analizi ve Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
8. Orhan, İ.,(2003). Kojenerasyon Tesislerinde Kullanılan Güç Teknolojileri. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.Eskişehir.
9. Sungur, B., et al.,(2017). Küresel Enerji Tüketimi Bağlamında Mikro Kojenerasyon Sistemlerinin Teknik ve Ekonomik Değerlendirilmesi. 58(686): p. 1-20.
10. <https://www.enerjiatlası.com/elektrik-uretimi/>, Türkiye Elektrik Üretimi.
11. Hinrichs, D.,(2004). Cogeneration.
12. Breeze, P., (2017). Combined Heat and Power. Chapter 1
13. Çalışıcı, M.Ü.,(2005). Kojenerasyon Sistemleri ve Bir İşletmenin İhtiyacını Karşılacak Kojenerasyon Sisteminin Teknik ve Ekonomik Uygulanabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü. p. 109.Antakya
14. ZOR, K., et al.,(2015). Türkiye' de Gaz Motorlu Kojenerasyon ve Trijenerasyon santralleri ile Elektrik Enerjisi Üretimi.p. 21-24.

15. Breeze, P.,(2019). Power Generation Technologies. Chapter 6.: Newnes.
16. Sala, J.M.,(2015). Thermal Energy Storage (TES) Systems for Cogeneration and Trigeration Systems, in Advances in Thermal Energy Storage Systems. Elsevier. p. 493-509.
17. Knowles, J.,(2011). Overview of Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems, in Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems. Elsevier. p. 3-16.
18. Yöntem, M.A.,(2011). Küçük Ölçekli Kojenerasyon Sistemlerinin Verimliliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. p. 107.Isparta.
19. Çetin, E.,(2017). 300 Yataklı Hastanede Kurulacak Kojenerasyon/Trijenerasyon Santralinin Teknoekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. p. 57.Edirne.
20. Campanari, S. and N. Fergnani,(2020). Cogeneration Plants for District Heating (and cooling), in Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes. Elsevier. p. 1-30.s
21. Dincer, I. and Rosen, M.,(2015). Exergy Analysis of Heating, Refrigerating and Air Conditioning: Methods and Applications. Chapter 5. Academic Press.
22. Öztürk, H., Kaya,H.,(2014). Kojenerasyon ve Trijenerasyon Tekniği. 2014.p 210.
23. <https://www.pinterest.com.au/pin/328199891581982213/>.
24. Dincer, I. and Rosen, M., (2007), Environment, and s. Development, Exergy Analysis of Cogeneration and District Energy Systems.p. 257-276.
25. Al Moussawi, H., et al.,(2017). Selection Based on Differences Between Cogeneration and Trigeration in Various Prime Mover Technologies. 74: p. 491-511.
26. Hawkes, A.,(2011). Techno-Economic Assessment of Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems, in Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems. Elsevier. p. 17-41.
27. Ekinci, D.,(2013). Erzurum Kampüs Hastanesine Uygulanacak Trijenerasyon Sisteminin Fizibilitesi. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. p. 140.Erzurum.
28. Yüksel, F. Kojenerasyon ve Yöremize Uygulanması. Available from: http://www.emo.org.tr/ekler/3782ef3356e45ba_ek.pdf.

29. Sonar, D., Renewable energy based trigeneration systems—technologies, challenges and opportunities, in Renewable-Energy-Driven Future. Elsevier. p. 125-168.
30. Akdeniz, N.,(2007). Doğal Gazlı Kojenerasyon Sisteminin Ekserjetik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. p. 150.Isparta.
31. <https://www.slideshare.net/BerrIndustry/trijenerasyon-kojenerasyon-projelendirme-mhendislik-danmanlk>. BERR INDUSTRY.
32. <https://www.enerjisistemlerimuhendisligi.com/buhar-turbini.html>.
33. Çakmak, H. Buharlı ve Birleşik Güç Çevrimleri. Available from: http://web.hitit.edu.tr/dersnotlari/hulyacakmak_02.05.2018_7E4P.pdf.
34. Mete, S.,(2012). Buhar Çevrimli Kojenerasyon Sistemlerinin Termoekonomik Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.İstanbul.
35. Goza, M.,(2013). Kojenerasyon Sistemleri ve Uygulamalı Ekonomik Analizi: Hastane Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Yalova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Yalova
36. Arpacı, İ.,(2002). Doğal Gazlı Kojenerasyon Sistemlerinde Exergy Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
37. Mert, M.S.,(2010). Bir Güç Santralinin Ekserjik ve Termoekonomik Analizi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
38. Çeçil, Ü.,(2018). Kojenerasyon ve Trijenerasyon Sistemlerinin Kullanılabilirliği ve Ekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. p. 85. Erzurum.
39. <https://www.protermenerji.com/tr/hizmet/gaz-turbini-ve-genarator-bakimi/>.
40. <https://docplayer.biz.tr/19214059-Bolum-9-gaz-akiskanli-guc-cevrimleri-bolum-9-gaz-akiskanli-guc-cevrimleri.html>.
41. Sancar, O.,(2009). Ticari Binalarda Uygulanan Kojenerasyon ve Trijenerasyon Sistemlerinin Teknoekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.İstanbul.
42. Çakır, U.,(2007). Aziziye Araştırma Hastanesi Enerji Gereksinimi için Kojenerasyon Sisteminin Uygulanabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü p. 136.Erzurum.
43. Amelio, M. and Morrone P.,(2020). Residential Cogeneration and Trigeneration, in Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes. Elsevier. p. 141-175.

44. Breeze, P.,(2017). Combined Heat and Power. Chapter 6.
45. Backman, J. and Kaikko, J.(2011). Microturbine Systems for Small Combined Heat and Power (CHP) Applications, in Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems. Elsevier. p. 147-178.
46. Sürer, F.,(2003). Kombine Gaz/Buhar Türbinli Kojenerasyon Sistemlerinin Termodinamik ve Ekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
47. https://tr.wikipedia.org/wiki/İçten_yanmalı_motor.
48. Mikalsen, R.,(2011). Internal Combustion and Reciprocating Engine Systems for Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Applications, in Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems.Elsevier. p. 125-146.
49. Isıtma, B.,(1998). Kojenerasyon' Konferansı Bildiriler Kitabı.MMO Yayım 210. İstanbul.
50. Breeze, P.,(2017). Combined Heat and Power. Chapter 3.
51. Harrison, J. and E. On,(2011). Stirling Engine Systems for Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Applications, in Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems. Elsevier. p. 179-205.
52. Brett, D., et al.,(2011). Fuel cell Systems for Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) applications, in Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems. Elsevier. p. 233-261.
53. Besergil,B. YakıtPilleri. Available from: http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/6_70.html.
54. Soltanimehr, S., F. Rezaei, and M.R. Rahimpour,(2020). Impact Assessment of Exhaust Gas Emissions from Cogeneration PEMFC Systems, in Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes. Elsevier. p. 49-64.
55. Breeze, P.,(2017). Combined Heat and Power. Chapter 7.
56. Larjola, J.,(2011). Organic Rankine Cycle (ORC) Based Waste Heat/Waste Fuel Recovery Systems for Small Combined Heat and Power (CHP) Applications, in Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems. Elsevier. p. 206-232.
57. Breeze, P.,(2017). Combined Heat and Power. Chapter 11.
58. Elçi, A.F.,(2018). Proje Karlılığının ve Takvim Aşımalarının Sistem Dinamikleri Yöntemi ile Analizi: Trijenerasyon Projesi Örneği. Yüksek Lisans, İstanbul Arel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.İstanbul.

59. Hergül, A.S.,(2007). Trijenerasyon Sistemlerinin Enerji, Ekonomik ve Çevresel Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Kocaeli.
60. Cengel, Y.A. and M.A. Boles,(2007). Thermodynamics: An Engineering Approach 6th Editon (SI Units). The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
61. İncili, V.,(2006). Jeotermal Enerji ile Absorbsiyonlu Soğutma Sisteminin Aydın İli Salavathı Jeotermal Bölgesinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. p. 102.Ankara.
62. Şahin, T.,(2006). İzmir İli için Jeotermal Enerji Kaynaklı Absorbsiyonlu Soğuk Oda Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. p. 107. Ankara.
63. Kaya, R.,(2017). Trijenerasyon Sisteminde Gaz Motoru Ünitesi Yağlama Yağının Soğutulmasından Elde Edilen Enerjinin Boyler Sisteminde Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, Beykent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
64. Calise, F., et al.,(2020). Dynamic Simulation and Thermo-economic Analysis of a Trigeneration System in a Hospital Application. 13(14): p. 3558.
65. Zihir, D. and Poredos,A.,(2006). Economics of a Trigeneration System in a Hospital. 26(7): p. 680-687.
66. Calise, F., et al.,(2017). A Novel Tool for Thermo-economic Analysis and Optimization of Trigeneration Systems: A Case Study for a Hospital Building in Italy. 126: p. 64-87.
67. Boschiero do Espirito Santo, D.,(2014). Energy and Buildings, An Energy and Exergy Analysis of a High-Efficiency Engine Trigeneration System for a Hospital: A Case Study Methodology Based on Annual Energy Demand Profiles. 76: p. 185-198.
68. Ulusam Seçkiner, S. and Koç, A.,(2020). Energy Applications and Studies for Healthcare Facilities-a Systematic Literature Review.26(4).
69. Suszanowicz, D. and P. Ratuszny.,(2019). Energy Efficiency Improvement in Hospital Buildings, Based on the Example of a Selected Type of Hospital Facility in Poland. in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing.
70. Carvalho, M., et al.,(2013). Synthesis of Trigeneration Systems: Sensitivity Analyses and Resilience.
71. Carvalho, M., et al.,(2012). Multicriteria Synthesis of Trigeneration Systems Considering Economic and Environmental Aspects. 91(1): p. 245-254.

72. Kavvadias, K. and Maroulis, Z.,(2010). Multi-objective Optimization of a Trigeneration Plant. 38(2): p. 945-954.
73. Teke, A., et al.,(2015). A Simple Methodology for Capacity Sizing of Cogeneration and Trigeneration Plants in Hospitals: A case Study for a University Hospital. 7(5): p. 053-102.
74. Lozano, M.A., et al.,(2009). Structure optimization of energy supply systems in tertiary sector buildings. 41(10): p. 1063-1075.
75. Valente, A., D. Iribarren, and J. Dufour,(2020). Life Cycle Assessment of Trigeneration Plants, in Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes. Elsevier. p. 125-139.
76. Pagliarini, G., Corradi, C. and Rainieri, S.,(2012). Hospital CHCP System Optimization Assisted by TRNSYS Building Energy Simulation Tool. 44: p. 150-158.
77. Murugan, S. and Horák, B.,(2016). Tri and Polygeneration Systems-A review. 60: p. 1032-1051.
78. Zhu, C., Xu, B. and Nie, Y.,(2019). An Integrated Design and Operation Optimal Method for CCHP System. 158: p. 1360-1365.
79. Cho, H., Smith, A. and Mago, P.,(2014). Combined Cooling, Heating and Power: A Review of Performance Improvement and Optimization. 136: p. 168-185.
80. Williams, A. and Hessami, M.,(1993). Two Case Studies of Cogeneration Systems Design and Economic Feasibility. 13(2): p. 167-186.
81. Alexis, G. and Liakos, P.,(2013). A Case Study of a Cogeneration System for a Hospital in Greece. Economic and Environmental Impacts. 54(2): p. 488-496.
82. Silveira, J.L., et al.,(2012). Ecological Efficiency and Thermo-economic Analysis of a Cogeneration System at a Hospital. 16(5): p. 2894-2906.
83. Muccillo, M., Gimelli, A. and Sannino, R.,(2015). Multi-Objective Optimization and Sensitivity Analysis of a Cogeneration System for a Hospital Facility. 81: p. 585-596.
84. Gimelli, A. and Muccillo, M.,(2013). Optimization Criteria for Cogeneration Systems: Multi-objective Approach and Application in an Hospital Facility. 104: p. 910-923.
85. Szklo, A.S., et al.,(2004). Energy Consumption Indicators and CHP Technical Potential in the Brazilian Hospital Sector. 45(13-14): p. 2075-2091.
86. Okamoto, S. Energy Saving by ESCO (Energy Service Company) Project in Hospital. in 7th International Energy Conversion Engineering Conference. 1801.

87. Renedo, C., et al.,(2006). Study of Different Cogeneration Alternatives for a Spanish Hospital Center. 38(5): p. 484-490.
88. Arcuri, P., Florio, G. and Fragiaco, P.,(2007). A Mixed Integer Programming Model for Optimal Design of Trigeneration in a Hospital complex. 32(8): p. 1430-1447.
89. Benelmir, R. and Feidt, M.,(1998). Energy cogeneration systems and energy management strategy. 39(16-18): p. 1791-1802.
90. Taşar, M.,(2019). Örnek Hastane Kampüsü İçin Uygun Birleşik Isı ve Güç Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. p. 157.Ankara.
91. Ascione, F., et al.,(2018). Energy Management in Hospitals.
92. <https://www.kafkas.edu.tr/bilgirehberi/tr/duyuru/Saglik>.
93. <https://www.serka.gov.tr/bolgemiz/kars/>.
94. <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=KARS>.
95. <https://www.mwm.net/mwm-kwk-bhkw/gasmotoren-stromaggregate/>.
96. https://www.lg.com/global/business/download/resources/sac/Catalogue_Absorption%20Chillers_ENG_F.pdf.
97. Aybers, N., Şahin, B., (1995). Enerji Maliyeti . İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Oğuz OTHAN

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Kars Fen Lisesi

Lisans : Marmara Üniversitesi Fen Bilgisi Öğretmenliği

Kafkas Üniversitesi Makine Mühendisliği