



**KOJENERASYON VE TRİJENERASYON
SİSTEMLERİNİN KULLANILABİLİRLİĞİ VE
EKONOMİK ANALİZİ**

Ümit ÇEĞİL

**Yüksek Lisans Tezi
Prof. Dr. Kadir BAKIRCI
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Bilim Dalı
2018
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KOJENERASYON VE TRİJENERASYON SİSTEMLERİNİN
KULLANILABİLİRLİĞİ VE EKONOMİK ANALİZİ**

Ümit ÇEĞİL

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Enerji Bilim Dalı**

**ERZURUM
2018**

Her hakkı saklıdır



**T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TEZ ONAY FORMU

**KOJENERASYON VE TRİJENERASYON SİSTEMLERİNİN
KULLANILABİLİRLİĞİ VE EKONOMİK ANALİZİ**

Prof. Dr. Kadir BAKIRCI danışmanlığında, Ümit ÇEĞİL tarafından hazırlanan bu çalışma 10/07/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı – Enerji Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Kadir BAKIRCI

İmza :

Üye : Prof. Dr. Kenan YAKUT

İmza :

Üye : Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 19/07/2018 tarih ve 29 / 31 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

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

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KOJENERASYON VE TRİJENERASYON SİSTEMLERİNİN KULLANILABİLİRLİĞİ VE EKONOMİK ANALİZİ

Ümit ÇEĞİL

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kadir BAKIRCI

Dünya nüfusunun artması ile birlikte insanların enerji tüketim ihtiyaçları da artmıştır. Bu nedenle insanoğlu artan enerji ihtiyaçlarını karşılamak için alternatif enerji kaynakları aramışlardır.

Birçok yatırımcı, yatırım yaparken birincil enerjiden tasarruf etmeyi amaçlamışlardır. Bu doğrultuda yapılan piyasa araştırmaları ve fizibilite çalışmaları yatırımcıları konvansiyonel sistemler yerine birleşik ısı-güç sistemlerine yönlendirmektedir. Birleşik ısı-güç sistemleri, tek bir ısı kaynağı kullanılarak enerjinin birden fazla formunun elde edildiği sistemlerdir. Bu sistemler hem birincil enerji açısından hem de ekonomik açıdan tasarruf sağlamaktadır. Özellikle kapasiteleri yüksek olan tesisler için uygun olan birleşik ısı-güç santralleri son zamanlarda birçok yatırımcı tarafından tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, örnek uygulamalar ile kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerin enerji ve ekonomik analizleri yapılmış, sistemler ve elemanları hakkında bilgi verilmiştir. Bu kapsamda, Erzurum şartlarında tasarlanan bir örnek üzerinden kojenerasyon sisteminin kullanılabilirliği incelenmiş ve sistemin ekonomik analizi yapılmıştır. Yapılan ekonomik analizde sisteminin geri ödeme süresi yaklaşık 3 yıl olarak bulunmuştur. Ayrıca, Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin enerji ihtiyaçlarını karşılamak üzere bir trijenerasyon sisteminin kullanılabilirliği araştırılmış ve bir fizibilite raporu hazırlanmıştır. Yapılan araştırma ve hesaplamalar sonucunda trijenerasyon sisteminin geri ödeme süresi yaklaşık 4 yıl olarak bulunmuştur.

2018, 85 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kojenerasyon, Trijenerasyon, Ekonomik Analizi

ABSTRACT

Master Thesis

USABILITY OF THE COGENERATION AND TRIGENERATION SYSTEM AND ECONOMIC ANALYSIS

Ümit ÇEĞİL

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

Supervisor: Prof. Dr. Kadir BAKIRCI

People's energy consumption needs have increased together with the increase in the world's population. Therefore, man has sought out alternative sources of energy to meet these increasing needs.

Many investors have aimed to save on primary energy when investing. Market research and feasibility studies in this direction have led investors to integrated heat-power systems instead of conventional systems. Combined heat-power systems are systems in which multiple forms of energy are obtained using a single heat source. These systems provide both primary energy and economical savings. Combined heat-power plants that is particularly suitable for installations with high capacities have recently been preferred by many investors.

In this study, energy and economic analyzes of cogeneration and trigeneration systems were made with sample applications, and information about systems and elements was given. In this context, the usability of the cogeneration system was examined through a sample designed in Erzurum conditions and the system was analyzed economically. In the economic analysis, the payback period of the system was found to be about **3 years**. In addition, the availability of a trigeneration system to meet the energy needs of the Meat and Milk Association's Erzurum Combine Plant (Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisi) was researched and a feasibility report was prepared. As a result of the researches and calculations, the repayment period of the trigeneration system was found to be about 4 years.

2018, 85 pages

Keywords: Cogeneration, Trigeneration, Economic Analysis

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlayıp sunduğum bu çalışmamın konusunun belirlenmesinde katkı veren, her aşamasında gerekli destek ve teşvikte bulunan, derin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım saygı değer Danışman Hocam Sayın Prof. Dr. Kadir BAKIRCI'ya ve Atatürk Üniversitesinin değerli hocalarına teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmam esnasında gerek teknik bilgi gerekse de konu hakkında yardımlarını esirgemeyen başta Borusan Güç Sistemleri CAT Satış Mühendisi Murat DURUCAN olmak üzere tüm Borusan Güç Sistemleri CAT firması çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin hazırlanması için gereken bilgileri temin etme hususunda yardımlarından dolayı Arş. Gör. Galip KALTAKKIRAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmamın hazırlanması esnasında maddi ve manevi hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan ve her zaman bana destek vererek yanımda olduğunu gösteren değerli ağabeyim Uğur ÇEĞİL'e ve sevgilimi aileme özellikle teşekkür ederim.

Ümit ÇEĞİL

Temmuz, 2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması	1
2. KURAMSAL TEMELLER	8
2.1. Kojenerasyon Sistemleri.....	8
2.2. Kojenerasyon Sistemlerinin Tarihçesi.....	9
2.3. Kojenerasyon Sistemlerinin Çalışma Prensipleri	10
2.4. Kojenerasyon Santral Türleri	11
2.4.1. Gaz türbinli kojenerasyon sistemleri.....	12
2.4.2. Buhar türbinli kojenerasyon sistemleri.....	16
2.4.3. Gaz motorlu kojenerasyon sistemleri	17
2.4.3.a. Gaz motorlu kojenerasyonda atık ısı kazanımı.....	19
2.4.3.b. Dizel motorlu kojenerasyon sistemleri.....	21
2.4.3.c. Stirling motorları	22
2.5. Kojenerasyon Sistemlerinin Faydaları	23
2.6. Kojenerasyon Kullanım Alanları.....	24
2.6.1. Endüstriyel.....	24
2.6.2. Merkezi.....	24
2.6.3. Küçük ölçekli	25
2.7. Kojenerasyonda Sistem ve Kapasite Seçimi	25
2.7.1. Yakıt	25
2.7.2. Elektrik/ısı oranı (EIO).....	26
2.7.3. Yük eğrisi	26
2.7.4. Başlama sayısı	27
2.7.5. Sıcaklık.....	27
2.7.6. Sistem kapasitesi	27

2.7.7. Elektrik kalitesi.....	27
2.8. Trijenerasyon Sistemleri.....	28
2.8.1. Trijenerasyon sistemlerinin çalışma prensibi	29
2.8.2. Trijenerasyon sisteminin elemanları	31
2.8.3. Absorpsiyonlu soğutma	32
2.8.3.1. Tek etkili absorpsiyonlu soğutma.....	33
2.8.3.2. Çift etkili absorpsiyonlu soğutma.....	35
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	37
3.1. Erzurum Şartlarında Örnek Birimin Isıl Enerji İhtiyacı	37
3.2. Erzurum Şartlarındaki İşletmenin Elektrik Enerjisi İhtiyaçları.....	39
3.3. Kojenerasyon Santrali	41
3.3.1. Kojenerasyon santralinin enerji analizi	42
3.3.2. Kojenerasyon santralindeki mali hesaplamalar	42
3.4. Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin Isı Enerjisi İhtiyaçları.....	44
3.5. Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin Elektrik Enerjisi İhtiyaçları.....	47
3.6. Trijenerasyon Santrali	50
3.6.1. Trijenerasyon santralinin enerji analizi	50
3.6.2. Trijenerasyon santralindeki mali hesaplamalar	51
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	52
4.1. Kojenerasyon Santralinin Enerji Analizi Sonuçları	52
4.2. Kojenerasyon Santralinin Mali Sonuçları	53
4.3. Trijenerasyon Santralinin Enerji Analizi Sonuçları	63
4.4. Trijenerasyon Santralinin Mali Sonuçları	64
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR	78
EKLER.....	81
EK 1.....	81
EK 2.....	82
EK 3.....	83
EK 4.....	84
EK 5.....	85
ÖZGEÇMİŞ	86

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

G_i	Toplam yıllık kazanç
G_y	Yatırım maliyeti
EER	Enerji verimlilik oranı
EIO	Elektrik ısı oranı
f	Yıllık faiz oranı



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kojenerasyon sistemi şematik gösterimi	8
Şekil 2.2. Kojenerasyon ile ayrıık enerji üretiminin karşılaştırılması.....	9
Şekil 2.3. Kojenerasyon şeması	11
Şekil 2.4. Gaz türbinli basit çevrimli kojenerasyon sistemi.....	12
Şekil 2.5. Gaz türbini sistem şeması	13
Şekil 2.6. Karşı basınçlı buhar türbini	16
Şekil 2.7. Ara buhar almalı türbin.....	16
Şekil 2.8. Gaz motorlu kojenerasyon santrali	18
Şekil 2.9. Dizel motor	21
Şekil 2.10. Dizel motorlu kojenerasyon sisteminin çalışma prensibi	22
Şekil 2.11. Stirling motoru.....	23
Şekil 2.12. Trijenerasyon	29
Şekil 2.13. Gaz türbinli trijenerasyon tesisinin şematik görünümü	30
Şekil 2.14. Absorpsiyonlu soğutma çevrimi	33
Şekil 2.15. Tek etkili absorpsiyonlu devre şeması.....	34
Şekil 2.16. Çift etkili absorpsiyonlu soğutma sistemi şeması.....	36
Şekil 3.1. Örnek birimin aylara göre yakıt (doğalgaz) tüketimi	38
Şekil 3.2. Örnek birimin aylara göre saatlik ısı enerjisi ihtiyacı.....	39
Şekil 3.3. Örnek birimin aylara göre elektrik tüketimi	40
Şekil 3.4. Örnek birimin aylara göre saatlik elektrik tüketimi.....	41
Şekil 3.5. Erzurum Kombina Tesis, idari bina, sosyal tesisler ve lojmanlar	44
Şekil 3.6. Erzurum Kombina Tesisinde ısıtma için kullanılan ekipmanlar	45
Şekil 3.7. Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin aylara göre yakıt (doğalgaz) tüketimi.....	46
Şekil 3.8. Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin aylara göre anlık ısı enerjisi ihtiyacı	47
Şekil 3.9. Erzurum Kombina Tesisinin elektrik ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılan ekipmanlar	47

Şekil 3.10. Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin aylara göre elektrik tüketimi	49
Şekil 3.11. Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin aylara göre saatlik elektrik tüketimi	49
Şekil 4.1. Aylara göre kojenerasyon sistemi öncesi ve sonrası şebekeden alınan saatlik elektrik miktarları.....	57
Şekil 4.2. Aylara göre kojenerasyon sistemi öncesi ve sonrası şebekeye ödenen saatlik elektrik ücreti	58
Şekil 4.3. Aylara göre kojenerasyon sisteminin saatlik elektrik miktarlarını karşılama yüzdeleri.....	59
Şekil 4.4. Aylara göre kojenerasyon sistemi öncesi ve sonrası anlık tüketilen ısı miktarları	60
Şekil 4.5. Aylara göre kojenerasyon sistemi öncesi ve sonrası anlık tüketilen ısı tutarları.....	61
Şekil 4.6. Aylara göre anlık ısı enerjisi ihtiyacı karşılama yüzdeleri	62
Şekil 4.7. Aylara göre trijenerasyon sistemi öncesi ve sonrası şebekeden alınan saatlik elektrik miktarı	69
Şekil 4.8. Aylara göre trijenerasyon sisteminin saatlik elektrik miktarlarını karşılama yüzdeleri	70
Şekil 4.9. Aylara göre trijenerasyon sistemi öncesi ve sonrası anlık tüketilen ısı miktarları	71
Şekil 4.10. Aylara göre trijenerasyon sistemi öncesi ve sonrası anlık tüketilen ısı tutarları	72
Şekil 4.11. Aylara göre trijenerasyon sisteminin anlık enerji ihtiyacını karşılama yüzdeleri	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Örnek birimin aylara göre doğalgaz tüketimi ve maliyetleri (1,26 TL/ m ³).....	38
Çizelge 3.2. Örnek birimin aylara göre elektrik tüketimi ve maliyetleri (0,4282 TL/kWh)	40
Çizelge 3.3. CG170-16 (2 MW) motorunun teknik özellikleri.....	42
Çizelge 3.4. Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin 2017 ve 2018 yılında aylara göre doğalgaz tüketimi ve maliyetleri.....	46
Çizelge 3.5. Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin 2017 yılında aylara göre elektrik tüketimi ve maliyetleri.....	48
Çizelge 3.6. JMS 312 Jenbacher (526 kW) motorunun teknik özellikleri.....	50
Çizelge 4.1. 2 MW gaz motorlu kojenerasyon santrali hesaplarında kullanılan kabuller	52
Çizelge 4.2. Aylara göre kojenerasyon öncesi ve sonrası toplam elektrik ve doğalgaz tutarları ile sistem getirisi	56
Çizelge 4.3. İlk yatırım maliyeti ile net karın gelecekteki değerleri ve geri ödeme süresi	62
Çizelge 4.5. Aylara göre trijenerasyon sistemi öncesi ve sonrası toplam elektrik ve doğalgaz tutarları	68
Çizelge 4.6. İlk yatırım maliyeti ile net karın gelecekteki değerleri ve geri ödeme süresi	73

1. GİRİŞ

Dünya nüfusu arttıkça insanların ihtiyaçları da artmaktadır. Doğal olarak nüfus artışı beraberinde birtakım ihtiyaçların artmasına neden olmaktadır. Bu gereksinimlerin başında insanların yaşamlarını idame ettirebilmeleri için enerji ihtiyaçları gelmektedir. İnsanların enerji ihtiyaçlarını elektrik, ısıtma ve soğutma oluşturmaktadır. Genel olarak bu ihtiyaçlar birbirinden bağımsız bir şekilde elde edilmektedirler. Ancak enerjilerin bu şekilde elde edilmesi, özellikle büyük yerleşimler için hem enerji hem de maddi açıdan zarar edilmesi anlamına gelir. Bu şekildeki zararların önüne geçilmesi açısından kojenerasyon, trijenerasyon sistemleri geliştirilmiştir.

Kojenerasyon sistemlerinde tek yakıt kaynağı kullanılarak enerjinin birden fazla biçimi elde edilebilmektedir. Yakıt olarak genellikle doğalgazın kullanıldığı bu sistemlerde hem elektrik hem de ısı üretimi mümkündür. Trijenerasyon sistemlerinde ise ısı ve elektriğe ek olarak soğutma ihtiyacı da karşılanır. Bu sistemler ekonomik açıdan büyük getirilere sahiptir. Ayrıca mevcut sistemde yakılan yakıttan daha az yakıt tüketilerek ülke ekonomisine de katkı sağlamaktadır.

Oteller, hastaneler, alışveriş merkezleri, kampüsler ve birçok endüstri alanında kojenerasyon ve trijenerasyon sistemleri tercih edilmektedir. Yapılan birçok araştırmada bu sistemlerin işletmeleri kâra geçirdiği tespit edilmiştir.

1.1. Literatür Araştırması

Smith and Twidel (1995) yaptıkları çalışmada, küçük ölçekli bileşik ısı güç santralleri için ekonomik analiz yaparak geri ödeme süresini belirlemişlerdir. Geri ödeme süresini yatırım miktarını yıllık santral gelirine oranlayarak bulmuşlardır.

Aikins (1995) çalışmasında, gaz türbinli kojenerasyon sistemlerini incelemiş olup 6,24 MW termik ve 3,5 MW elektriksel güçteki bir tesis için elektrik fiyatlandırması

yapmıştır. Kojenerasyon sisteminin maliyeti, ilk yatırım maliyeti, işletme ömrü ve faize bağlı bir amortisman faktörü ile çarpılarak bu değere yakıt ve diğer giderlerin katılmasıyla hesaplanmıştır. Aynı ısı gücünü konvansiyonel bir kazan ile sağlanması halinde de aynı maliyet analizi yapılmıştır. Elektrik fiyatlandırması bu iki maliyet analizinin birbirinden çıkartılmasıyla bulunan farkın kojenerasyon sisteminin elektrik üretim değerine bölünmesiyle yapılmıştır.

Derbentli (1996) yaptığı çalışmada, kojenerasyon sisteminin seçiminde kullanılacak parametreleri incelemiş, termodinamik ve ekonomik analizi bir örnekle açıklamıştır. Bileşik ısı güç üretiminin uygunluğunun yıllık gelirlerle yıllık giderlerin kıyaslaması sonucu tespit edileceğini belirtmiştir. Kojenerasyon sisteminin ekonomik olabilmesi için elektrik ve ısı gelirlerinin yakıt ve sabit yatırım giderlerinden fazla olmasının gerektiğini vurgulamıştır. Ayrıca faiz ve yakıt fiyatlarının düşük, elektrik ve ısı fiyatlarının yüksek olmasının uygulamayı pozitif yönde etkileyeceğini vurgulamıştır.

Frangopoulos *et al.* (1996) kombine çevrimli kojenerasyon sistemi ile çalışan Yunanistan Aspropyrgos Rafinerisinde (HAR) termoekonomik yönden optimizasyon modeli üzerinde yaptıkları çalışmada, HAR petrol rafinerisinde günde 130 bin varil petrol üretmişlerdir. Rafinerinin elektrik ve ısı ihtiyacı 54 MW kapasiteli kombine çevrimli kojenerasyon santralinden karşılanmıştır. Santralde iki adet gaz türbini, iki adet atık ısı kazanı, dört adet yakıt kazanı ve bir adet buhar türbini bulunmakta olup, yüksek, orta, düşük ve çok düşük olarak dört farklı basınç üretilmiştir. Yakıt kazanları düşük sülfür yakıtıyla çalışırken gaz türbinleri dizel yakıt ve LPG ile çalışmıştır. Çevresel, ekonomik ve teknik şartlar belirlendikten sonra gereksinim duyulan elektrik ve buhar miktarları için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Sistemin ekonomik yönden minimum masraf modeli belirlenmiştir.

Riad and Michel (1998) yaptıkları çalışmada, kojenerasyon sistemlerinde elektrik enerjisi ve termal enerjilerin birim maliyetlerini hesaplayarak termo-ekonomik analizlerini karşılaştırmışlardır. Bu çalışma sonucunda kojenerasyon sistemlerinin verimli olduğunu göstermişlerdir.

Bidini *et al.* (1999) yaptıkları çalışmada, Perugia Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde kullanılan 1 MW Cater-Pillar-3516 doğalgaz yakıtlı motorda bileşik ısı-güç üretiminde gerçek performans değerlendirmesi yapılmıştır. Değerlendirmede; yıl boyunca alınan verilerden kojenerasyon sisteminin ekonomik ve teknik veriminin iyi değerlerde olduğu belirtilmiştir. Ayrıca sistemin çevre dostu olduğu da vurgulanmıştır.

Guarinello *et al.* (2000) “Bir Gaz Türbinli Kojenerasyon Sisteminin Termoekonomik Değerlendirmesi” adlı makalede, Brezilya’da yerleşik olan bir endüstri bölgesinin ısı ve elektrik ihtiyaçlarını karşılama gayesindeki projelendirilmiş bir buharlı gaz türbini kojenerasyon sistemine termoekonomik kavramları uygulamıştır. Güç santrali; termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlarına dayalı olarak değerlendirilir. Ekserjetik maliyet teorisini kullanan bir termoekonomik analiz, elektrik ve buhar üretim maliyetlerini sırayla belirlemek için geliştirilmiştir. Elektrik güç üretiminin düzeyiyle ilişkili iki hipotetik çalışma durumu göz önüne alınmıştır.

Costa and Balestieri (2001), “Kimya Sanayinde Kojenerasyon Sistemleri ile İlgili Ortak Çalışma” ile Brezilya enerji yapılanmasına doğal gazın büyük ölçüde girmesiyle birlikte, kâğıt fabrikaları ve kimya işletmeleri gibi endüstriler kojenerasyon projelerinin bu yakıt türüne uygunluğunu sağlamanın fizibilitesini analiz etmeye başladılar. Fotoğrafçılık sektöründen bir kimya şirketinin enerji talebine yönelik modellerin analizleri, kombine çevrim sistemleri bulunan ve ayrıca absorpsiyonlu soğutma üniteleri bulunan dizel kojenerasyon projelerinin kullanılabileceği imkanını ortaya çıkarmıştır.

Luz-Silveria *et al.* (2002) bir üniversite kampüsünün kojenerasyon sisteminin termoekonomik analizini yapmışlar. Bu çalışmada, kojenerasyon sistemi atık kazanına bağlantılı bir gaz türbininden oluşmaktadır. Kampüsün elektrik ihtiyacı 9 MW fakat kojenerasyon sistemi üniversitenin elektrik ihtiyacının yaklaşık 3’te 1’ni üretmektedir.

İnallı vd (2002) yapmış oldukları çalışmada, kojenerasyon sistemlerini teknik ve ekonomik açıdan inceleyerek uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Ayrıca kojenerasyon

tekniklerinin termodinamik analizlerini yaparak uygun sistem seçimi konusunda bilgiler vermişlerdir.

Kıncay ve Yumurtacı (2006) yaptıkları çalışmada, Yıldız Teknik Üniversitesi Davut Paşa kampüsünün yıllık elektrik ve ısı tüketimlerini hesaplayarak, buna en uygun kojenerasyon sisteminin ekonomik analizini yapmışlardır. Bu analiz sonucunda üniversiteye yapılacak olan kojenerasyon tesisinin toplam gelirinin 1.884.171,4 \$, geri ödeme süresinin 1,25 yıl, sistemin net işletme gelirinin ise 573.672,1 \$ olduğu hesaplanmış ve uygulamanın karlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Ehyaie and Bahadori (2007) yapmış oldukları çalışmada, Tahran, Ahvaz ve Hamedan şehirlerindeki konutların elektrik, sıcak su ihtiyacı, ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarının karşılanması için mikro türbinlerin kullanılmasını araştırmışlardır. İnceleme yapılan bina 10 daire ve 8000 m²'lik alana sahiptir. Binanın pik talepleri ölçülmüş daha sonra binanın ısı yalıtımı yapılarak pik enerji tüketimi düşürülerek yeni elektrik yüküne göre hesap yapılmıştır. Yapılan bu hesaplamalardan sonra bir optimizasyon yapılarak 2 adet 30 kW yada 1 adet 40 kW gücünde Capstone marka mikro türbin seçilmiştir.

Özdemir (2011), İstanbul Çekmeköy İlçesi'nde bulunan beş sitenin ısı yalıtım projelerini ve gerçek tüketim değerlerini inceleyerek bir kojenerasyon sisteminin uygulanabilirliği için fizibilite çalışması yapmıştır. Bu çalışmada kojenerasyon sistemi üç durumda incelenmiştir. Birincisi; sitelerin ayrı ayrı değerlendirildiği, ikincisi, üç sitenin birlikte değerlendirildiği ve son durum beş sitenin birlikte değerlendirildiği kojenerasyon sistemidir. Sonucunda beş siteyi besleyen kojenerasyon sistemi ekonomik ve geri ödeme süresi en az olarak belirlenmiştir.

Ekinci (2013) yaptığı çalışmada, Erzurum Kampüs Hastanesi için trijenerasyon sisteminin uygulanabilirliğini araştırmış ve inşa edilebilirliğinin etkin ekonomik analizini gerçekleştirmiştir. Sonucunda oluşturduğu gelir gider tablosu sayesinde sistemin geri ödeme süresini 2,9698 yıl olarak bulmuştur.

Üçgül ve Elibüyük (2015), Süleyman Demirel Üniversitesi için trijenerasyon sisteminin uygulanabilirliği hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, üniversite yerleşkesinin enerji ihtiyaçları göz önüne alınarak, üniversitenin elektrik, ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını karşılayabilecek bir doğalgazlı trijenerasyon sistemi incelenmiş ve bu doğrultuda ekonomik analiz yapılarak geri ödeme süresi belirlenmiştir. Üniversitenin enerji ihtiyaçlarına göre 2 adet 1063 kW gücünde gaz motoru seçilmiştir. Seçilen gaz motoruna göre yapılan hesaplamalar sonucunda sistemin işletme giderlerinin 7537897 TL, sistemden elde edilen kazancın ise 9661364 TL olduğu sonucuna varılmıştır. Üniversitenin bu durumda yıllık net kazancı 2123467 TL olmuştur. Sistemin yatırım maliyeti ise 4636500 TL'dir. Yatırım maliyetini yıllık net kazançla bölerek sistemin geri ödeme süresini 25 ay olarak tespit etmişlerdir.

İmal vd (2016), Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Sağlık Uygulama ve Araştırma Hastanesi için kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin uygulanabilirliğini araştırmışlar ve bu doğrultuda iki sistem için geri ödeme sürelerinde kıyaslama yapmışlardır. Bu çalışmada, hastanenin elektrik tüketiminin en yüksek olduğu ay dikkate alınarak elektrik çıkış gücü 1300 kWe olan 2 adet Cat G3516B gaz motoru kullanılmasına karar verilmiştir. Kojenerasyon ve trijenerasyon sistemi için yapılan ekonomik analizde yıllık faiz oranı %8,5 ve sistem ömrü 20 yıl olarak kabul edilmiştir. Kojenerasyon sistemi için yatırım maliyeti 4685830 TL olup sistemden elde edilen yıllık net kazanç 1957232 TL'dir. Bu değerler dikkate alındığında sistemin geri ödeme süresi 2,78 yıl olarak hesaplanmıştır. Trijenerasyon sistemi için yatırım maliyeti 6087865 TL olup sistemden elde edilen yıllık net kazanç 2311288 TL'dir. Bu değerler dikkate alındığında sistemin geri ödeme süresi 3,1 yıl olarak hesaplanmıştır. Sistemlerden elde edilen atık ısının kullanılması ile hastanenin ısıl enerji ihtiyaçlarının %44,2 sinin, soğutma ihtiyaçlarının ise %11'inin karşılandığı tespit edilmiştir.

Huang *et al.* (2017) şehir merkezlerinden uzakta yaşayan insanlar için enerji depolama amaçlı biyoyakıt kaynaklı trijenerasyon sistemlerini teknik ve ekonomik açıdan incelemiş ve modelleme yaparak performans analizi yapmışlardır. Bu çalışmada, köye elektrik, ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını karşılamak ve büyük yük değişikliklerini

dengelemek için hem elektrik hem de termal enerji depolama cihazları entegre edilmiştir. Önerilen sistemler ECLIPSE simülasyon programı kullanılarak modellenmiş ve simüle edilmiştir. Kullanılan sistem sayesinde hem teknik performans hem de emisyonlar incelenmiştir. Bunların yanı sıra, elektrik ve termal enerjilerin etkisi de araştırılarak, sistemlerin ekonomik analizi yapılmıştır. Bir hane için, içten yanmalı motor esaslı trijenerasyon sisteminin, ısı-elektrik oranı değerinin 1,5'in altında olduğu ve biyokütle kazanı ile Stirling motoru tabanlı sistemin ısı için daha faydalı olduğu bulunmuştur. Elektrik enerjisi talep oranı ise 3 ile 3,4 arasında değişmektedir. Modelenmiş trijenerasyon sistemlerinin tekno-ekonomik analizi yapılmıştır. Bu analizler sonucunda biyo-yakıtlar tarafından ateşlenen trijenerasyon sisteminin elektrik tüketiminin yaklaşık %64-70'lik kısmını karşıladığı tespit edilmiş ve elektrik tüketim fiyatlarının yaklaşık 313 £ / MWh ila 357 £ / MWh arasında kârlı bir değişimin olduğu görülmüştür.

Sevinçhan ve Dinçer (2018), üç ayrı trijenerasyon sistemi için karşılaştırmalı olarak performans değerlendirmesi yapmış ve trijenerasyon sistemlerinin enerji analizlerini yapmışlardır. Bu doğrultuda üç adet trijenerasyon sistemi değerlendirilmiştir. Bu sistemlerden birincisi, bir gazlaştırıcı, bir açık tip Brayton çevrimi, bir organik Rankine çevrimi (ORC), bir tek etkili absorpsiyonlu soğutucu ve bir ısı geri kazanım ünitesinden oluşmaktadır. İkinci sistem, bir biyokütle ayrıştırıcı, bir açık tip Brayton çevrimi, bir organik Rankine çevrimi (ORC), bir tek etkili absorpsiyonlu soğutucu ve bir ısı geri kazanım ünitesinden oluşmaktadır. Üçüncü sistem ise, bir biyokütle brülörü, kapalı tip bir Brayton çevrimi, bir organik Rankine çevrimi, bir tek etkili absorpsiyonlu soğutucu ve bir ısı geri kazanım ünitesinden oluşmaktadır. Bu üç trijenerasyon sistemi, bir süt çiftliğinin elektrik, ısı ve soğutma enerjisi ihtiyaçlarını karşılamak için tasarlanmıştır. Yapılan analiz sonuçlarında, önerilen sistemlerin toplam enerji verimlilikleri birinci, ikinci ve üçüncü trijenerasyon sistemleri için sırası ile %84,1 (73,46 kW enerji üretimi), %63,23 (104,1 kW elektrik üretimi) ve %84,4 (49,83 kW enerji üretimi ile) olarak tespit edilmiştir. Sistemden elde edilen atık ısı miktarı, her üç sistem için 30,07 kW'dır. Absorpsiyonlu soğutma sisteminin performans katsayısı, aynı soğutma çıkışı için tasarlanan trijenerasyon sistemleri için 0,70'dir.

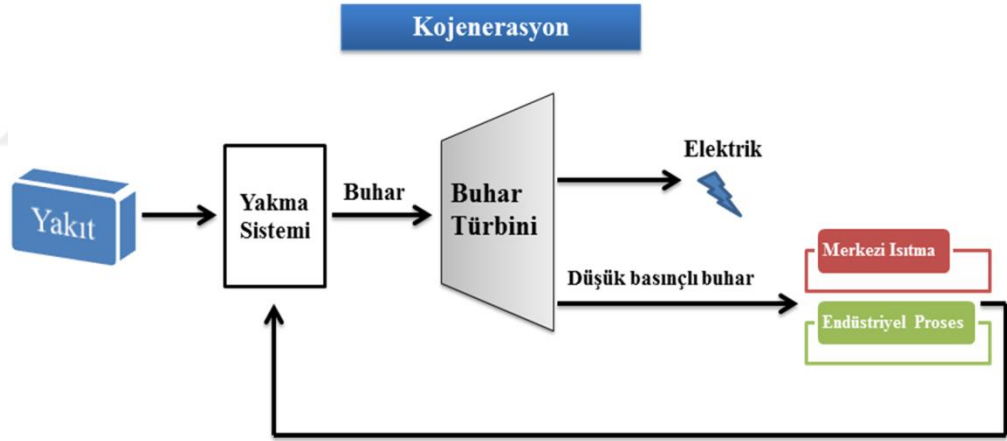
Bu çalışmada, örnek uygulamalar ile kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerin enerji ve ekonomik analizleri yapılmış, sistemler ve elemanları hakkında bilgi verilmiştir. Bu kapsamda, Erzurum şartlarında tasarlanan bir örnek üzerinden kojenerasyon sisteminin kullanılabilirliği incelenmiş ve sistemin ekonomik analizi yapılmıştır. Ayrıca, Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin enerji ihtiyaçlarını karşılamak üzere bir trijenerasyon sisteminin kullanılabilirliği araştırılmış ve bir fizibilite raporu hazırlanmıştır.



2. KURAMSAL TEMELLER

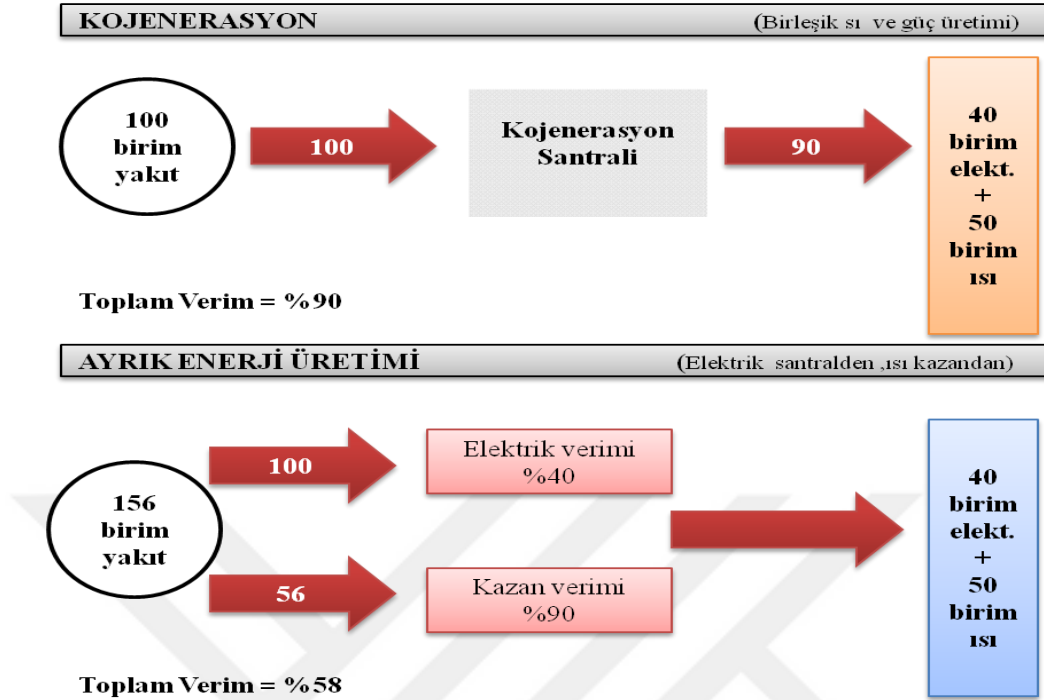
2.1. Kojenerasyon Sistemleri

Kojenerasyon sistemleri, tek bir enerji kaynağından faydalanılarak enerjinin birden fazla yararlı biçiminin tasarlandığı sistemlerdir. Kojenerasyon sistemiyle aynı anda hem ısı hem de elektrik üretimi mümkündür. Kojenerasyon ile hem yakıt tasarrufu hem de enerji verimliliği sağlanır. Enerji üretimi çevre korunumu açısından daha yararlı duruma gelir. Uzun yıllardır tüm dünyada birçok kuruluş, kojenerasyon sistemini tercih etmektedirler. Böylelikle, hem kendileri tasarruf ederken hem de çevreci bir politika izlemiş olmaktadır.



Şekil 2.1. Kojenerasyon sistemi şematik gösterimi

Kojenerasyon, hem elektrik hem de ısı enerjisinin aynı sistemden birlikte üretilmesidir. Bu şekildeki üretim, iki enerji biçiminin de tek tek ayrı yerlerde elde edilmesinden çok daha ekonomik sonuçlar ortaya çıkarır. Yalnızca elektrik üreten bir gaz türbini veya motoru, kullandığı enerjinin %35-40 kadarını elektriğe dönüştürürken, kojenerasyon sisteminde atık ısıнын kullanılmasıyla tüketilen toplam enerjinin %70-90 arasında değişen büyük bir bölümü değerlendirilmiş olur.



Şekil 2.2. Kojenerasyon ile ayırık enerji üretiminin karşılaştırılması

2.2. Kojenerasyon Sistemlerinin Tarihçesi

Kojenerasyon teknolojisinin, temel basit ilk uygulama örnekleri 1900'lü yılların başlarında görülmeye başlamıştır. Fakat yakıtın ucuz olduğu dönemde terk edilmiştir. 1973-1979 petrol krizi sonrasında daha da geliştirilerek tekrar uygulanmaya başlanmıştır.

Kojenerasyon, 20. yüzyılın başlarından itibaren, yerleşim birimlerinde kurularak bölgesel ısıtma yapılması amaçlanmıştır. Bu uygulama, 1940-1970 yılları arasında yakıt fiyatlarının düşmesiyle çekiciliğini yitirmiştir. 1970'li yıllarda yakıt fiyatlarının hızlı bir şekilde artmasıyla dünya genelinde kojenerasyona giderek artan bir ilgi olmuştur. Kojenerasyon ekonomik açıdan kazançlı hale gelmiştir. Bunun sonucunda son yıllarda bu tür santrallerin kurulması hızlanmıştır.

Kojenerasyon sistemi, merkezi ısıtmanın çok kullanıldığı ülkelerde daha erken gelişme imkanı bulmuştur. Amerika Birleşik Devletleri'nde konutlar çok yüksek olması sebebiyle sıcak su ile ısıtma yapılamamaktadır. Bunun yerine alçak basınçlı buhar kullanılmaktadır. Bu sistemin kullanılmasının sebeplerinden biri de yaz aylarında büyük klima tesisleri için buhara olan ihtiyaçtır. Bu yüzyılın sonuna kadar Amerika Birleşik Devletleri'nde elektriğin %15'inin kojenerasyondan sağlanması umulmaktadır. İngiltere'de 1945 yılından itibaren kojenerasyon sistemlerinin gelişmesi ile birlikte bölge ısıtması da hızla yaygınlaşmıştır. Fransa'nın ilk büyük bölge ısıtma tesisi Paris'te yapılmıştır. Almanya'da 1930'lu yıllardan sonra merkezi ısıtma sistemine geçilmiştir. Kuzey Avrupa'da İsveç, Danimarka gibi ülkelerde de binaların %30-80'i kojenerasyon ile ısıtılmaktadır (İnalı vd 2002).

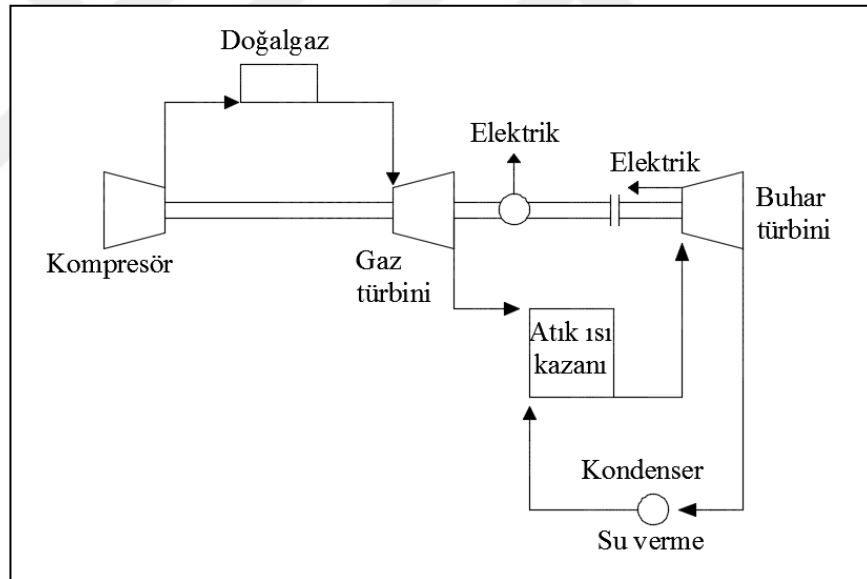
2.3. Kojenerasyon Sistemlerinin Çalışma Prensipleri

Gaz türbinli bir kojenerasyon santralinde, atmosferden alınan hava, filtre sisteminden geçirilerek kompresör kısmına iletilir ve burada sıkıştırma işlemi sonrasında yanma odasına gönderilir. Yanma odasına giren yakıt, sıkıştırılmış hava ile birlikte yanar. Yanma sonucunda oluşan 1100-1200°C sıcaklığın üzerindeki yüksek basınçlı gaz, türbin kanatçıklarına çarparak türbin milini döndürür ve türbine bağlı jeneratörden elektrik üretilir. Gaz türbinini terk eden 550-600°C sıcaklığındaki atık gaz, bir egzoz kanalı vasıtasıyla atık ısı kazanına aktarılır. Atık ısı kazanına giren egzoz gazının sıcaklığı düşer ve soğur. Soğuyan egzoz gazı kazan basıncından atmosfere atılır.

Atık ısı kazanında, genellikle üç ayrı ısı değiştirici bölümü bulunmaktadır. Rankine çevriminde, su ilk olarak ekonomizer kısmına girer ve doyma sıcaklığının çok az altında bir sıcaklığa kadar ısıtılarak buharlaştırıcı kısmında buhar haline dönüşür ve bu doymuş buhar kazanda yeniden ısıtılarak, kızgın buhar halinde buhar türbinine gönderilir. Bu olay, tek basınç kademeli bir kazan-buhar türbini grubu için verilen bir Rankine çevrimidir. Ancak kazan-buhar türbini gruplarının tekrar kızdırmalı veya tekrar kızdırmazsız olmak üzere, iki ya da üç basınç kademesi için, Rankine çevrimi atık ısı kazanı içerisinde ayrı ayrı yer alır. Bu basınç kademelerine bağlı olarak Rankine

çevrimi de kendi içinde ayrı ayrı çevrimler oluşturur. Atık ısı kazanından elde edilerek buhar türbinine verilen buhar, türbin kademelerinde genişir. Böylece, ısı enerjisi mekanik enerjiye dönüşmüş olur. Türbin ünitesinin tahrik edilmesi sonucu ile de türbine bağlı jeneratörden elektrik enerjisi üretilmiş olur.

Buhar türbininden çıkan alçak basınç ve düşük sıcaklıktaki buhar, yoğuşturucuya gelerek, burada soğutma sistemi yardımı ile yoğuşturularak su haline dönüştürülür. Ardından, içlerindeki yoğuşmamış olan gazın uzaklaştırılması amaçlanarak pompalar aracılığıyla besleme suyu tankına gönderilir. Su, buradan besleme suyu pompaları vasıtasıyla tekrar atık ısı kazanına gönderilir. Bu şekilde, Rankine kapalı çevrimi kazan, buhar türbini ve kondenser arasında dolaşımını sürdürür (Öztürk ve Kaya 2014).



Şekil 2.3. Kojenerasyon şeması

2.4. Kojenerasyon Santral Türleri

Bileşik ısı güç santrallerinde ısı ve güç üretimi için başlıca güç kaynakları aşağıdaki gibidir.

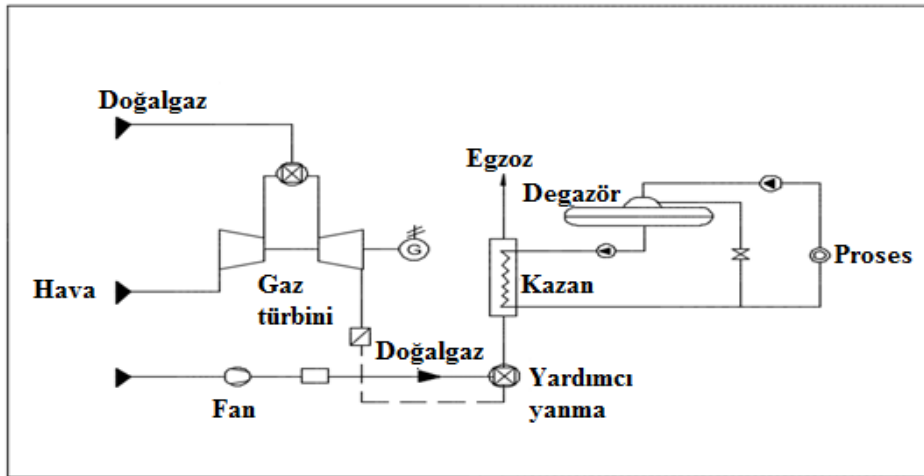
1. Gaz türbinli kojenerasyon sistemleri

2. Buhar türbinli kojenerasyon sistemleri

3. Gaz motorlu kojenerasyon sistemleri

2.4.1. Gaz türbinli kojenerasyon sistemleri

Gaz türbinleri son yıllarda büyük ölçekli bileşik ısı güç santrallerinde en yaygın olarak kullanılan tahrik üniteleridir. Bu sistemler, yanma odasında komprese verilmiş hava ile enjekte yakıt karışımının ateşleme düzeni ile yakılması sonucu oluşan yüksek basınç ve sıcaklıktaki yanma gazının türbin kanatçıklarını döndürmesi için kullanılır. Böylece, kapakların bağlı olduğu mil döndürülmüş olur. Bu mil de bağlı olduğu jeneratörü tahrik eder (Gencay 1999).

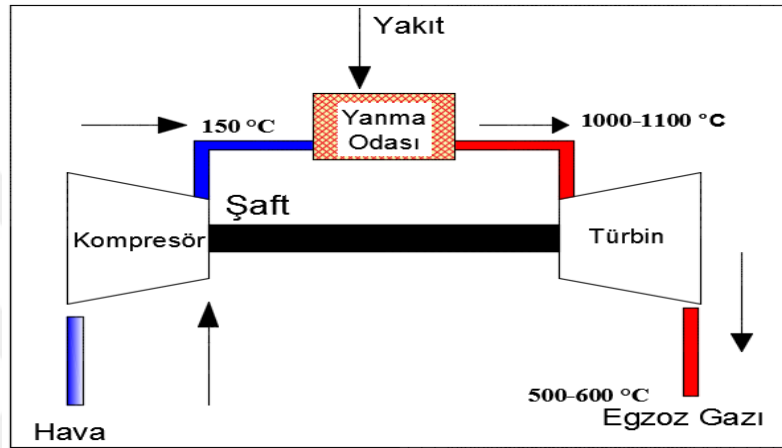


Şekil 2.4. Gaz türbinli basit çevrimli kojenerasyon sistemi

Gaz türbinli kojenerasyon tesisi teknik olarak şu şekilde çalışır.

Hava kompresör tarafından sıkıştırılır. Sıkıştırılan havanın sıcaklık ve basıncı yükselir. Yaklaşık 150°C sıcaklığındaki kızgın hava yanma odasına gelir. Öte yandan yanma odasına yüksek basınçlı yakıt (Doğalgaz, LPG gibi) püskürtülür. Burada hava ile yakıt basınç altında yanar ve yanma sonucu 1000-1100°C sıcaklığında egzoz gazı açığa çıkar. Açığa çıkan egzoz gazı türbinden geçerek sistemden ayrılır. Egzoz gazı türbinden

geçerken türbin kanatçıklarını döndürür. Böylece türbin ve kompresör arasında bulunan mil de dönmeye başlayarak mekanik enerji açığa çıkar. Meydana gelen mekanik enerjiye karşılık egzoz gazının sıcaklığı $500-600^{\circ}\text{C}$ 'a kadar düşer. Sıcaklığı ve basıncı düşmüş olan egzoz gazı türbinden çıktıktan sonra atık ısı kazanına gelir. Burada elde edilen buhar veya sıcak su proses ısısında kullanılarak değerlendirilmiş olur.



Şekil 2.5. Gaz türbini sistem şeması

Gaz türbinlerinin başlıca bileşenleri; kompresör, türbin ve yanma odasıdır (Şekil 2.5).

Kompresör: Genel olarak iki çeşit kompresör mevcuttur. Bunlar, sırasıyla merkezi ve ekseneldir. İlkinde hava, merkezde alınıp yarıçap boyunca, hızı ve basıncı artarak ilerler. Hız oldukça yükselir, sonrasında ise hız azalarak basınç artırılır. Sıkıştırmanın sonunda ve başında basınç oranları $1/3$ ile $1/4$ mertebesinde. Merkezi motorlar çok daha güçlü ve ekonomik olarak uygundur. Ancak verimleri düşük olup genelde küçük güçler için tercih edilirler.

Eksenel akışlı kompresörlerde ise, arka arkaya sıralanan sabit ve hareketli kanatlar mevcuttur. Hareketli olanlar havaya enerji aktarırken sabitler ise hızı basınca dönüştürür. Eksenel akışlı kompresörler birçok devreye sahiptir. Bu devrelerin her birinde rotor ve stator mevcuttur. Genelde 6-7 devreden oluşurlar. Çok devreli olmaları beraberinde maliyeti de artırır. Çok küçük olanlar dışında verimleri diğer çeşitlerine

göre yüksektir. Merkezi olanların verimleri 0,78-0,82 arasında değişirken, eksenel akışlı kompresörlerin verimleri 0,82-0,87 arasında değişmektedir.

Türbin: Kompresörlere kıyasla daha basit yapıdadırlar. Verimleri 0,87-0,90 arasında değişirken, akış esnasında oluşan türbülans verimi azaltmaktadır. Genellikle türbinler eksenel akışlı olup, merkezi olanları enderdir.

Yanma odası: Yanma odaları bir ya da birden çok olabilir. Yanma odaları ve karışımın uygun bileşimi deneyler sonrasında belirlenir.

Türbin ve jeneratör grupları aynı alt temel üzerine inşa edilirler ve aralarında türbinin yüksek hızını jeneratörün ihtiyaç duyduğu düşük hıza getiren bir redüktör bulunur. Bu elemanların yerleştirildiği temel inşaat işi uygun özelliklerde olmalıdır.

Gaz türbinlerinin avantajlarından bazıları aşağıda sıralanmıştır:

- Az yer kaplarlar.
- Birçok yakıt türü kullanılabilir.
- Montaj ve devreye alma süreleri kısadır.
- Bakımları kolay ve bakım süreleri kısadır.
- Soğutma suyuna ihtiyaç yoktur.
- Otomatik sistemler oldukları için tekniker maliyeti gerektirmez (Öztürk ve Kaya 2014).

Gaz türbinlerinin dezavantajlarından bazıları aşağıda sıralanmıştır:

- Güç çıkışı, belirli tasarım özelliklerine bağlıdır.
- Mekanik verimleri gaz motorlarına kıyasla, daha düşüktür.
- Rakımı düşük yerlerde verimi azalır.
- Verimleri düşüktür.

Gaz türbinlerinde kullanılan yakıtlar: Gaz türbinleri, yüksek hız ve sıcaklık değerlerinde çalışmaktadır. Bu nedenle, yakıt kalitesi oldukça önemlidir. Sıcak besleme gazları çok temiz olmalı, kanatlarda aşınmaya neden olacak partiküller içermemeli ve çalışma sırasında korozyona sebebiyet verecek kirlilikler en düşük seviyede tutulmalıdır. Bu sorunların yaşanmaması için genellikle yüksek değerli yakıt kullanılır. En düşük düzeyde korozyona neden olan bir yakıt kullanılmalıdır. Doğalgaz bu tür bir yakıt olduğu için sıklıkla tercih edilir. Ayrıca gaz yağı, biyogaz ve maden gazları gibi atık gazlar da kullanılabilir. LPG, nafta ve sıvı yakıtlar da gaz türbinlerinde yakılabilmektedir.

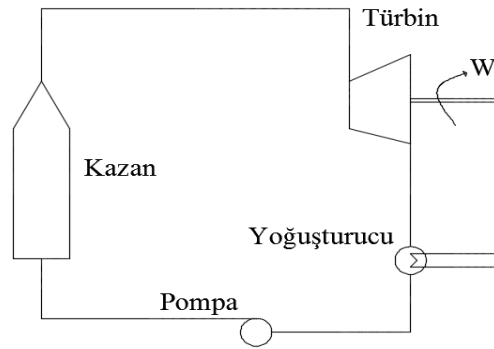
Gaz türbini verimi: Gaz türbininden çıkan egzoz gazlarının sıcaklığı oldukça fazladır. Bu nedenle egzoz gazları, atık ısı kazanında değerlendirilip, ısı enerjisi ihtiyaçlarında kullanılır. Gaz türbinlerinin güçleri 1 MW'ın altında ise, düşük verim ve yüksek maliyetten dolayı kullanımları uygun değildir. Gaz türbinleri genel olarak 1 MW ve daha yüksek güçlerde kullanılmaktadır. Gaz türbinlerinde, türbin çıkış gücünün 2,5-3 katı kadar ısı elde edilir. Bu açıdan belirli şartlar dahilinde ısı ihtiyaçlarının fazla olduğu tesislerde kullanımı yaygındır.

Isı gücünün mekanik güce oranı, türbin mil verimi olarak tanımlanır. Bu değer, havanın giriş sıcaklık ve basıncına bağlı olarak %20-40 arasında değişmektedir. Uygulamalarda türbin mil verimi %30 değeri dikkate alınarak seçilir. Gaz türbin veriminde etkili olan bir faktör de yük oranıdır. Yük oranı %70'in altında ise türbin verimi düşer. Gaz türbini verimi, diğer içten yanmalı motorlara kıyasla düşüktür. Gaz türbini veriminin düşük olmasının nedeni, türbin kanatçıklarının daima yüksek sıcaklık altında çalışması ve bunun sonucunda izin verilen malzeme gerilmelerinin düşük olmasıdır.

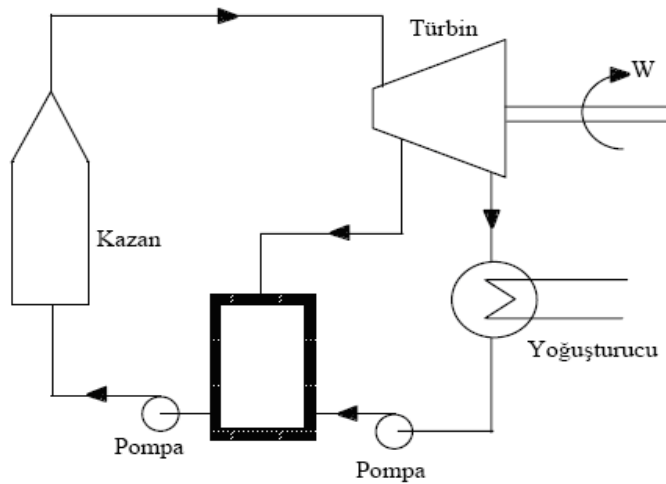
Gaz türbinlerinin güç çıkışı ve verimi, ara soğutucu, ara ısıtıcı ve rejeneratör kullanılarak artırılabilir. Burada ara soğutucu kompresörün verimini artırırken, ara ısıtıcı ise türbin verimini arttırır. Rejeneratör ise hem yakıt tüketimini hem de egzoz ısı miktarını azaltır.

2.4.2. Buhar türbinli kojenerasyon sistemleri

Buhar türbinli kojenerasyon sistemi, genel olarak bir kazan ve bir karşı basınçlı buhar türbininden (Şekil 2.6) meydana gelir. Bu sistemde, 45-110 bar basıncında 400-500 °C sıcaklıkta buhar elde etmek için fosil yakıtlar veya çeşitli atıklar yakılır. Bu yüksek basınçlı buhar, bir rotorun döndürme hareketini sağlamak için buhar türbinine gönderilir. Türbinin jeneratörü tahrik etmesi ile de elektrik üretilir. Türbini terk eden daha düşük sıcaklık ve basınçtaki buhar bir proseste kullanılabilir hale gelir. Karşı basınçlı türbine alternatif olarak, aynı tarzda çalışan ancak endüstriyel bir proseste kullanılmak için orta kademelerde farklı basınç ve sıcaklıklarda buhar çekilebilen, ara buhar almalı türbinler (Şekil 2.7) de kullanılabilir.



Şekil 2.6. Karşı basınçlı buhar türbini



Şekil 2.7. Ara buhar almalı türbin

Karşı basınçlı türbin, çıkışındaki basıncın yüksek tutulması ilkesine göre çalışır. Türbin çıkışında akışkan, yoğuşturucu yerine ısı değiştiriciye girer. Bu sistemler, buhar üreten mevcut buhar türbinlerinden ve sadece elektrik üreten konvansiyonel tesislerden %10-30 daha verimlidir. Buhar türbinleri, gaz türbinleri ya da dizel motorlarına kıyasla, elde edilen birim güç başına daha az yakıt gereksinimi duyarlar. Ancak, diğer sistemlere kıyasla elektrik üretimleri üretilen proses buharından daha azdır.

Proses buhar ihtiyacının sabit olmaması veya türbin için gerekli miktardan daha az olması durumunda, karşı basınçlı sistemler yerine ara buhar almalı türbinler tercih edilir (Yörü 2008).

Ara buhar almalı santrallerde, türbine giren buhar belirli bir basınca kadar genişledikten sonra bir kısmı proses ısı değiştiricisine gönderilir ve burada proses ısı ihtiyacının bir kısmının karşılanması için kullanılır. Ara buhar almalı türbinden çekilen buhar miktarı değiştirilerek, sistem değişik ısı elektrik oranı değerlerinde çalıştırılabilir. Dolayısıyla, ısı gereksiniminin değişken olduğu sistemlerde kullanılır (Mert 2010).

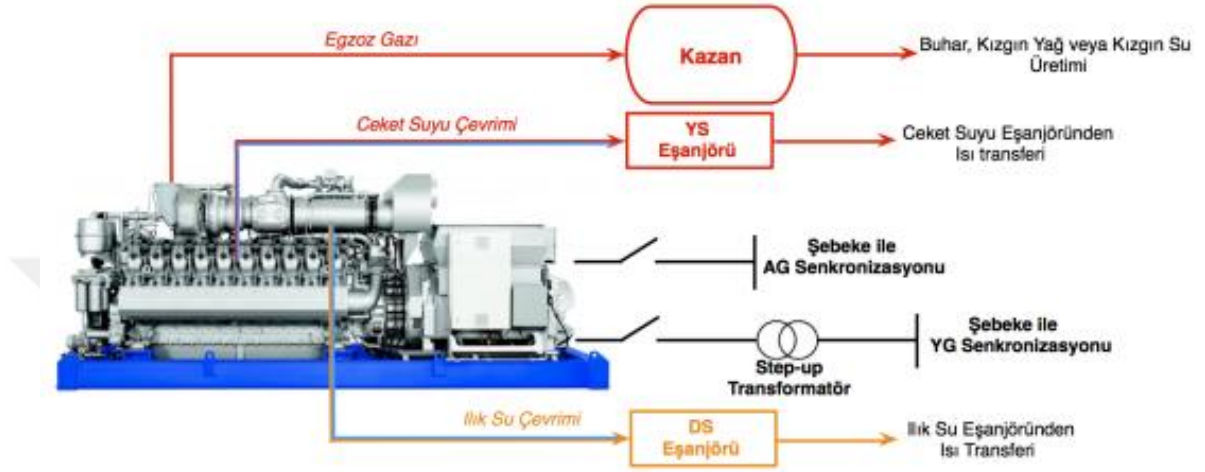
2.4.3. Gaz motorlu kojenerasyon sistemleri

Bu kojenerasyon sistemlerinde içten yanmalı motorlar kullanılmaktadır. Diğer güç kaynaklarıyla kıyaslandığında, güç üretiminde verimleri daha yüksektir. Isı geri kazanımı için, yüksek sıcaklıktaki egzoz gazı ve düşük sıcaklıktaki motor ceket soğutma suyu sistemi olmak üzere iki ısı kaynağı mevcuttur.

Gaz motoru termodinamik özellikleri açısından Otto çevrimine bağlı olarak ve çok silindirli, 50-3500 kW güç aralığında çalışan sistemdir. Isı üretimleri güç çıkışından 1-1,5 kat daha fazladır. Gaz motorlarında başta doğalgaz olmak üzere LPG, propan, biyogaz, çöplük gazı gibi yakıtların kullanılması da mümkündür.

Gaz motorlu kojenerasyon sistemlerinin daha düşük sıcaklıkta ve miktarda atık ısı sağlamasından dolayı, özellikle elektrik ihtiyacı, ısı ihtiyacından fazla olan, yani

elektrik ısı oranı yüksek olan endüstriyel uygulama alanlarında, büyük oteller, tatil köyleri, toplu konut gibi ısı ve soğutma ihtiyacı olan uygulamalarda kullanılması verimli sonuçlar ortaya çıkarır.



Şekil 2.8. Gaz motorlu kojenerasyon santrali

Pistonlu bir gaz motorunda yanan yakıtın enerjisinin dönüştüğü türleri şu şekilde sıralayabiliriz:

- %35-40'lık bölümü mekanik güce,
- %30-35'lik bölümü motor gömlek ısısına,
- %25-30'luk bölümü egzoz ısısına ve
- %7-10'luk bölümü radyasyon enerjisi olarak kaybolur.

Gaz motorlu sistemlerin başlıca üstünlükleri şunlardır (Koçak ve Gülşen 2010):

- Elektrik çevrim veriminin %40'lara ulaşmasıyla yüksek miktarda elektrik üretilir. Elektrik ihtiyacının, ısı ihtiyacına oranı daha yüksek olan uygulamalar için kullanılması daha caziptir.

- Toplam çevrim verimi %85-91 arasında değişkenlik gösteren türbinli sistemlerle kıyaslandığında, türbinli sistemlerde elektrik çevrim verimi arttıkça, toplam çevrim verimi önemli derecede azalır.
- Fakir karışım veya katalizörlü emisyon seviyesi oldukça düşüktür. Modern fakir karışım yakma sistemlerine sahip olan motorlar, NO_x emisyonlarını azaltmak amacıyla katalizöre gereksinim olmaksızın, uzun süre izin verilen emisyon değerleri seviyesinin altında çalışabilmektedir.
- Gaz motorunun devreye alma ve devre dışı bırakma kolaylığı mevcuttur. Ayrıca, daha az devre elemanına sahip olmasından dolayı diğer sistemlere göre daha kısa zamanda tesis edilebilmektedir.
- Gaz motorlarında doğalgazın yanı sıra, çöplük gazı ve kok gazı gibi yakıtlar da kullanılabilir. Atıklardan elde edilen gaz yakıtlar, elektrik ve ısı elde etmek için doğrudan kullanılabilirler.

2.4.3.a. Gaz motorlu kojenerasyonda atık ısı kazanımı

Bir kojenerasyon sisteminde ısı geri kazanımı, atılan ısı enerjisinin faydalı ısı enerjisine dönüşmesidir. Atık ısı kullanımı, yakıt yakan yerlerin yakıt miktarının azalmasına yardımcı olur. Kullanılabilir ısı miktarı; kojenerasyonda kullanılan güç üretim sistemine ve gereksinim duyulan ısı enerjisinin özelliklerine bağlıdır. Ayrıca ısı enerjisinin kullanım yeri de güç üretim sisteminin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Motorlardan ısı geri kazanımı beş yolla yapılır.

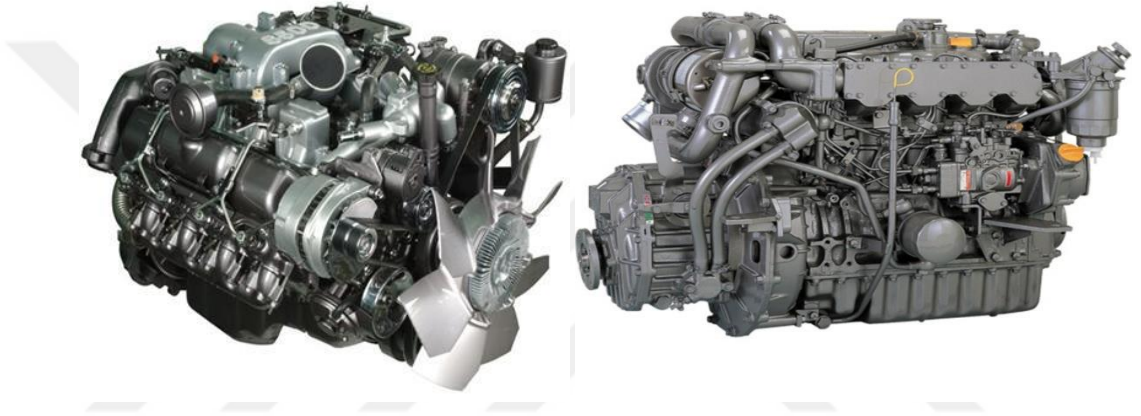
- Yanma havasının soğutulması ile ısı geri kazanımı: Gaz motoru yaklaşık 4°C sıcak koşullarda çalışır. Ayrıca motor kendi de ısı üretmektedir. Yakıtın yanması sonuca açığa çıkan ısıнын tamamı faydalı bir şekilde kullanılamaz. Taşınım ve ışıının ortak etkisiyle açığa çıkan ısı, motorun bulunduğu ortamı ısıtır. İçten yanmalı motorlarda yanma havası kompresörler aracılığı ile sabit basınçta sıkıştırılır. Basınçlandırılan havanın sıcaklığı artarken aynı zamanda hacmi de artmaktadır. Hacmi büyüyen havanın kompresörler tarafından sıkıştırılabilmesi için daha fazla

enerjiye ihtiyaç duyulur. Bu nedenle, motorda kullanılacak havanın sıcaklığı 25°C olmalıdır.

- Yağlama yağından ısı geri kazanımı: Pistonlu bir motorda, giren enerjinin yaklaşık %10'u yağlama yağı ile atılır. Yüksek kaliteli yağlama yağları, genellikle 75-90°C arasındaki sıcaklıklarda kayba uğramadan çalışır. Yağın ömrü, çalışma sıcaklığından etkilenir. Çalışma sıcaklığı ne kadar düşerse yağın ömrü o kadar uzar. Ancak, sıcaklığın düşük olması yağın geri kazanılabilir ısı miktarının olumsuz yönde etkilenmesi anlamına gelir.
- Ceket ısısı geri kazanımı: Motoru soğutmak için, ceket suyu motorda dolaştırılır. Ceket suyu soğutucusuna 95°C sıcaklığında giren ceket suyu, 45°C sıcaklığında ceket suyu soğutucusundan çıkar ve motora geri gönderilir. Ceket soğutma sistemi, motora giren enerjinin yaklaşık 1/3'ünü motordan uzaklaştırır. Motordan uzaklaştırılan enerji ısı enerjisidir ve bu enerjinin neredeyse tamamı geri kazanılabilir niteliktedir. Isı enerjisi, ihtiyaca göre ister 130°C'ye varan sıcak su olarak, istenilirse de 105 kPa'lık düşük basınçlı buhar olarak geri kazanılabilir.
- Egzoz ısı geri kazanımı: Motordan çıkan egzoz gazlarının sıcaklığı 720-570°C arasında değişmektedir. Egzoz gazlarının sıcaklığı, motorun özelliğine ve yükleme oranına göre değişkenlik göstermektedir. Egzoz gazları ile atılan ısı enerjisi, isteğe ve ihtiyaca göre sıcak su veya düşük basınçlı buhar elde etmek için kullanılabilir. Kojenerasyon sistemlerinde kullanılan motorların egzoz boruları yalıtılmalıdır. Böylelikle, egzoz boruları kazan dairesi ısısından etkilenmemiş olacaktır. Ayrıca, gereğinden fazla art basınçlarına sebep olmamak için, egzoz sistemlerinde sert kıvrımlardan kaçınılmalıdır.
- Baca sıcaklığından ısı geri kazanımı: Ekonomizerler, duman gazlarından faydalanan ısı geri kazanım üniteleridir. Duman gazından ekonomizerde faydalandıktan sonra, bacadan dışarı atılması gerekmektedir. Bacaya gönderilen duman gazı sıcaklığı ekonomizerde üretilmek istenen sıcak su veya buhardan daha düşük olamaz. Aralarında en az 20°C sıcaklık farkı olması gerekir ve sıcaklığı fazla olması istenen duman gazıdır. Duman gazı ile su arasında ısı transferi olması bu ancak bu koşulla sağlanır. Duman gazının enerjisinden maksimum seviyede faydalanabilmek için, duman gazı sıcaklığı 50°C seviyesine düşürülmelidir.

2.4.3.b. Dizel motorlu kojenerasyon sistemleri

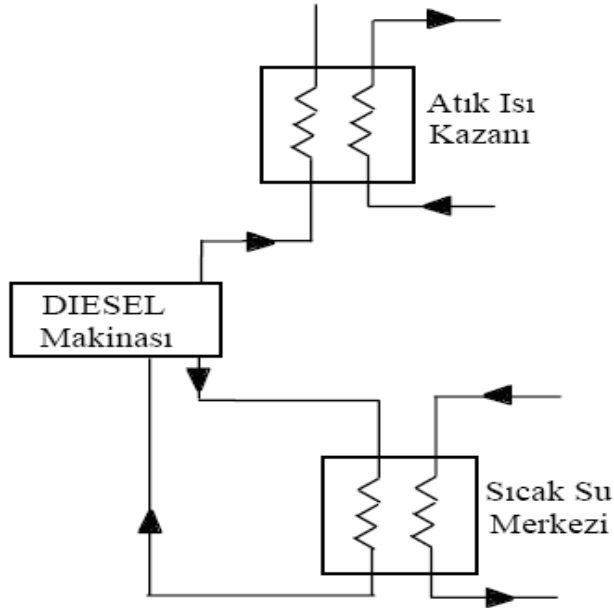
Dizel motorlar (Şekil 2.9), çıkış güçleri 200-22000 kW arasında değişmekte olup, çok silindirlidirler. Dizel motorlarda yakıt olarak motorin veya ağır fuel-oil yakıtlar kullanılmaktadır. Atık ısı üretimi düşük olan dizel motorların elektrik üretim verimi oldukça yüksektir.



Şekil 2.9. Dizel motor

Dizel motoru termodinamik olarak Diesel çevrimine göre çalışmaktadır. Gaz motoruna göre dizel motorunda, hava daha yüksek basınçla sıkıştırılmaktadır. Dizel motorda, piston alt ölü noktası daha aşağıdadır. Dizel motorun mekanik verimi, gaz motorundan daha yüksektir. Bunun nedeni, dizel motorunun sıkıştırma oranının yüksek ve genişlemenin daha fazla olmasıdır.

Dizel motorlu bir kojenerasyon sisteminin çalışma prensibi Şekil 2.10'da gösterilmiştir. İşlem ısısı için motorun egzoz gazlarından ve soğutma suyundan yararlanılabilir. Dizel veya gaz motorlarının kullanımı, ısı verimlerinin yüksek olması ve çeşitli yakıtlarla çalışabilmeleri nedeniyle yaygınlaşmıştır.

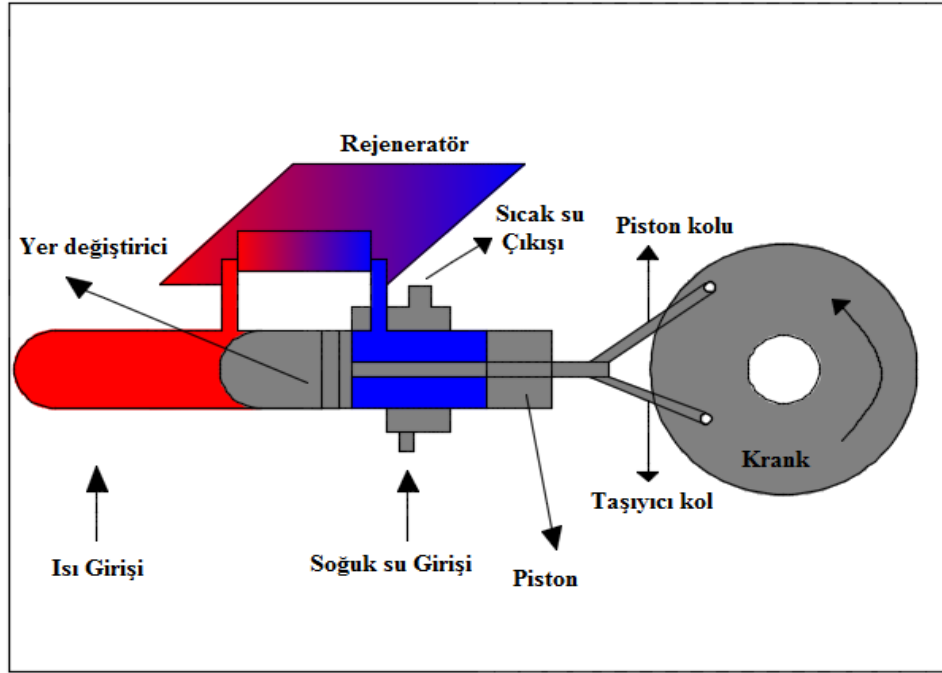


Şekil 2.10. Dizel motorlu kojenerasyon sisteminin çalışma prensibi

2.4.3.c. Stirling motorları

Dıştan yanmalı motorlar olarak bilinen Stirling motorları, gaz yakıtlardan solar enerjiye kadar geniş bir enerji kaynağına sahiptirler. Motorda elde edilen ısı, iş yapan akışkanı genleştirerek pistonun hareketini sağlar. Genleşmiş olan akışkan motorun soğuk bölgesine iletilir ve burada bulunan piston vasıtasıyla tekrar sıkıştırma işlemi yapılır. Akışkan bu kısımdan tekrar motorun sıcak bölgesine gönderilir ve çevrim sağlanmış olur.

Burada rejeneratör, iş yapan akışkana verilen ısıyı tutarak ikinci çevrimde tekrar ısı vermek için daha az yakıt kullanılmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.11. Stirling motoru

2.5. Kojenerasyon Sistemlerinin Faydaları

Genel anlamda kojenerasyon sistemlerinin faydalarını şu şekilde sıralayabiliriz:

- Enerjinin iletilmesinde ve kullanılmasında önemli derecede verim artışı sağlar.
- Enerji maliyetleri bakımından ciddi manada tasarruf sağlar.
- Diğer sistemlere nazaran daha az zararlı emisyon yayarlar. Özellikle CO₂ yayımı oldukça azdır. Bu da çevreci bir sistem olduğunu göstermektedir.
- Bu sistemlerin gelişip yaygınlaşması beraberinde iş olanağı da sağlamaktadır.
- Yerel elektrik üretimi sağlayan bu sistemlerde nakil kayıpları oldukça azdır.
- Ülke ekonomisine önemli derecede katkı sağlarlar.
- Montaj ve devreye alma süreleri kısadır.
- Bakım süreleri kısa ekipman ömrü uzundur.

2.6. Kojenerasyon Kullanım Alanları

Kojenerasyon sistemlerinin kullanım alanları üç başlıkta toplanabilir.

2.6.1. Endüstriyel

Elektrik ve ısı ihtiyacı fazla olan endüstride kojenerasyon sistemi kullanımı oldukça yaygındır. İşletmelere önemli miktarlarda kar sağlamaktadırlar. Bu alanda örnek endüstriler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- İlaç ve kimya sanayi
- Tuğla ve çimento sanayi
- Tekstil sanayi
- Petrol rafinerileri
- Motor sanayi
- Seramik sanayi
- Gıda endüstrisi
- Madencilik işletmeleri
- Cam fabrikaları
- Demir çelik endüstrisi

2.6.2. Merkezi

Merkezi bir santralde elektrik ve ısı birlikte üretilir. Sıcak su veya buhar aracı akışkan olarak sıcak su veya buhar kullanılan bu uygulamada ısı, boru şebekeleri aracılığıyla bölgeye dağıtılır. Genellikle bu uygulama, Estonya, Danimarka gibi Kuzey Avrupa ve Polonya, Romanya gibi Doğu Avrupa ülkelerinde yaygın olarak görülmektedir.

2.6.3. Küçük ölçekli

Genellikle 5 MW gücünden küçük ısı makinelerinin kullanıldığı yerlerdir. Gaz türbinlerinin ve motorlarının paket türlerinin gelişmesiyle birlikte son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Küçük ölçekli kullanım alanlarına aşağıdaki örnekler verilebilir.

- Oteller
- Hastaneler
- Hava alanları
- Hapishaneler
- Kampüsler
- Alışveriş merkezleri

2.7. Kojenerasyonda Sistem ve Kapasite Seçimi

Kojenerasyon sistemleri seçilirken; sistemin ekonomikliği, sistem verimi ve kullanıcı gereksinimleri göz önünde bulundurulmalıdır. Kojenerasyon uygulamalarının kurulum maliyeti yüksek olduğundan dolayı sistemin fizibilite çalışması ayrıntılı bir şekilde yapılmalıdır. Kojenerasyon sistemi kurulmasına karar verilmeden önce, bu işte öncü firmalarla ortak çalışma yürütülmesi yatırımcı için faydalı olacaktır. Kojenerasyon sistemi seçiminde dikkate alınan değişkenler başlıklar halinde verilmiştir.

2.7.1. Yakıt

Kojenerasyon sistem seçimi, kullanılması planlanan yakıt türü veya türlerine göre yapılır. Bazı uygulamalarda iki veya üç yakıtlı sistemler kullanılmaktadır. Çöplük gazı ve arıtma gazı ile çalışan sistemler, doğrudan sadece yakıt dikkate alınarak seçilen sistemlerdir. Bu tesislerde birincil enerjinin işletme maliyeti sıfır olduğu için arıtma tesisi bulunan kuruluşlar için kojenerasyon sistemi daha cazip hale gelmektedir. Yakıt seçiminde dikkate alınan en önemli etken, yakıt fiyatlarıdır. Türkiye genelinde en çok

kullanılan yakıt doğalgazdır. Çünkü doğalgaz kullanılan yerlerde sistem çok daha ekonomik olmakla birlikte geri ödeme süresi de kısa olmaktadır. Doğalgazın avantajlarından bazıları aşağıdaki gibidir:

- Bulunması kolay bir yakıttır.
- Yanma özellikleri oldukça iyidir.
- Çevre dostu bir yakıttır.
- Depolama ihtiyacı yoktur.
- Ekonomik açıdan geçerliliği olan bir yakıttır.

2.7.2. Elektrik/ısı oranı (EIO)

Kojenerasyon sistemi seçilirken uygulanacak olan sistemin ısı ve mekanik güç gereksinimleri göz önünde bulundurulması gereken en önemli değişkenlerdendir. Yeni kurulacak tesisler için bu ihtiyaçlar ve birbiriyle oranları sistem seçimi için gerekli ve birincil faktördür. Gaz motorlu kojenerasyon sistemlerinde EIO, 0,75-0,80 arasında değişirken, gaz türbinli kojenerasyon sistemlerinde bu değer, 0,40-0,50 civarındadır. Gaz motorlarında toplam enerji çıkışının yaklaşık %40'ı elektrik olarak elde edilirken, yaklaşık %50'si de ısı güç olarak geri kazanılabilir. Gaz türbinlerinde ise toplam enerji çıkışının 1/3'ü elektrik, 2/3'ü ısı güçtür.

2.7.3. Yük eğrisi

Isı ve elektrik yük eğrileri dikkate alınarak sistem seçimi yapılır. Eğer yük eğrisi gün içerisinde veya haftanın, yılın çeşitli zamanlarında çok değişkenlik gösteriyorsa; yük eğrisi birden fazla bölgeye ayrılarak, tüketimin birden fazla ünite ile karşılanması gerekmektedir. Örneğin, gündüz 600 kW, gece ise 300 kW elektrik ihtiyacı olan bir işletmenin elektrik tüketimini karşılamak için, 300 kW'lık iki gaz motoru kullanmak daha verimli olacaktır.

2.7.4. Başlama sayısı

Gaz motorlarının devreye alınabilmesi daha kolay olduğu için, yıllık başlama sayıları fazla olan işletmeler için gaz motoru kullanımı daha avantajlı olmaktadır.

2.7.5. Sıcaklık

Gaz türbinlerinin çıkış güçleri ve ısı oranları gaz motorlarına göre ortam sıcaklığına daha fazla hassasiyet gösterirler. Bu nedenle bazı uygulamalarda, ortam sıcaklığına çok daha fazla duyarlı olmayan gaz motoru kullanımı zorunlu hale gelmektedir.

2.7.6. Sistem kapasitesi

Kojenerasyon sisteminde ihtiyaç duyulan ısı ve elektrik ihtiyaçları arttıkça, tercih edilen sistem, gaz türbinine doğru yönelmektedir. Genelde piyasada, 15-20 MW kapasiteli yerlerde gaz motorları, bu güç seviyesinin üzerinde olan yerlerde ise gaz türbinleri tercih edilmektedir. Bu seçim aslında elektrik-ısı kullanım oranına göre yapılmaktadır. Eğer bir sistemde çok az ısı kullanılıyorsa, kombine çevrimli gaz türbini kurmak daha faydalıdır. Ülkemizde elektrik fiyatının daha pahalı olması nedeniyle ve elektriksel verimin gaz motorlarında daha yüksek olması sebebiyle, gaz motoru seçimi daha ekonomik bir tercih olmaktadır.

2.7.7. Elektrik kalitesi

Elektrikteki frekans ve gerilim hassasiyetinin yüksek olduğu işletmelerde, bazı durumlarda sistemin kar oranına ya da şebeke elektriğinin devamlılığına bakılmaksızın, kojenerasyon uygulaması zorunlu hale gelebilir. Özellikle hassas elektronik cihazların bulunduğu tesislerde (tekstil, bilgisayar, vs.) frekans ve gerilim değerlerinin toleransı çok düşüktür. Eğer tesiste bu tür sorunlar varsa, kojenerasyon sistemi bu kuruluş için kaçınılmaz olur. Tolerans miktarı azaldıkça sistem seçimi gaz motorundan gaz türbinine

doğru kaymaktadır (Sakawa *et al.* 2001).

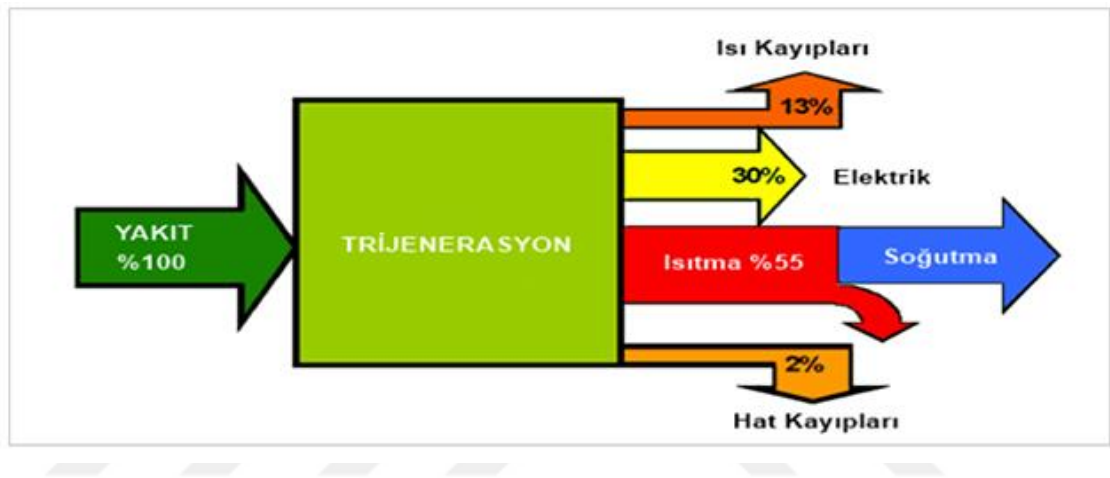
2.8. Trijenerasyon Sistemleri

Kojenerasyon sistemleri özellikle yaz aylarında kış aylarına göre ısı ihtiyacının daha az olması nedeniyle verimleri daha az olmaktadır. Bu sebeple bu sistemler geliştirilerek trijenerasyon sistemleri ortaya çıkarılmıştır. Kojenerasyon sonucu elde edilen sıcak su veya buhar soğurmalı soğutucular vasıtasıyla soğutmada kullanılması esasına dayanan sisteme “trijenerasyon” denir. Sistemde üretilen elektrik veya ısı enerjisinin bir kısmı kullanılarak soğutma enerjisi üreten soğutma bileşenleri mevcuttur. Elektrik enerjisi kullanan soğutma ünitelerine elektrik tahrikli; ısı enerjisini kullanan soğutma ünitelerine ise absorpsiyonlu (soğurmalı) veya adsorpsiyonlu (yüzeye verme) soğutma üniteleri adı verilmektedir. Tüketilen yakıt miktarı kojenerasyon sistemiyle aynı olmasına rağmen elektrik, ısı ve soğutma ihtiyaçları karşılanabilmektedir. Bu sistemle yakıttan yararlanma oranı en yüksek değere ulaşmakta ve toplam verim bu sayede artırılabilir (Çalışıcı 2005; Çaka 2006).

Özellikle karbondioksit (CO₂) ve sera gazları gibi çevreye zararlı emisyonları azaltır, yüksek yakıt ve maliyet tasarrufu sağlaması nedeniyle endüstriyel ve ticari kullanıcılar için rekabet gücü sağlamaktadır. Yerel tüketicilerin ihtiyaçlarını karşılayacak yerlere kurulabildiğinden elektrik ve ısı ihtiyacında kesinti riskini ortadan kaldırır. Enerji güvenliğine katkıda bulunarak elektrik iletim kayıplarını önler ve kullanılan yakıt ihtiyacı azalacağından ithal enerji bağımlılığını düşürür (Ballı 2008).

Başlıca iki çeşit temel soğutma tekniği mevcuttur. Bunlar, kompresörlü (sıkıştırılmalı) soğutma ve absorpsiyonlu soğutma tekniğidir. Aralarındaki temel fark, kompresörlü soğutma tekniğinde enerji kaynağı olarak elektrik kullanılır. Termodinamik açıdan absorpsiyonlu soğutma ünitesinin kojenerasyon sistemlerine dahil edilmesi, yüksek oranda verim artışını sağlamaktadır. Çünkü absorpsiyonlu soğutma sistemi için kojenerasyon sisteminden atılan egzoz gazı kullanılır. Bu şekilde konvansiyonel işlemlerle elde edilen enerji tek bir sistemle elde edilmiş olur. Bu sayede hem sistemin

verimi artmış hem de yakıttan tasarruf edilmiş olur. Bir trijenerasyon sistemi, bir kojenerasyon sisteminden elde edilen ısıнын bir kısmını kullanarak soğutma yapan bir buhar absorpsiyonlu soğutucu bulundurur. Absorpsiyonlu soğutucularda çalışan aksam sayısı diğer soğutma gruplarına kıyasla daha az olduğundan dolayı, arıza yapma olasılığı ve bakım ihtiyacı daha azdır. Parça sayısının az olması ayrıca gürültü seviyesini de düşürmektedir (Orhan 2003; Çaka 2006).



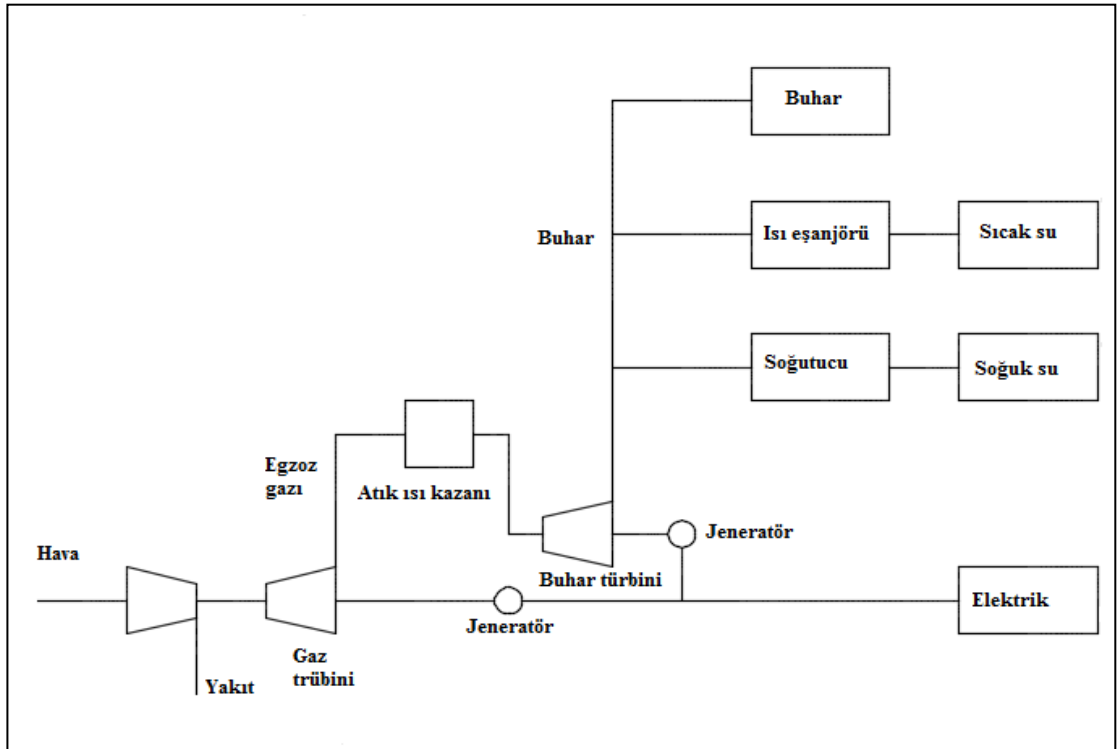
Şekil 2.12. Trijenerasyon

2.8.1. Trijenerasyon sistemlerinin çalışma prensibi

Atmosferden çekilen hava, bir filtre sisteminden geçirilerek gaz türbininin kompresör kısmına girer ve burada sıkıştırılarak yanma odasına gönderilir. Püskürtülerek verilen yakıt, yanma odasında (12-35 bar) bu sıkıştırılmış hava ile karışarak yanar. Yanma odası çıkışında 1000-1500°C sıcaklıktaki yüksek basınçlı sıcak gazlar gaz türbini kanatlarından geçerek türbini döndürür ve türbine bağlı jeneratörden elektrik enerjisi üretilir. Gaz türbininden çıkan sıcak atık gazlar (400-600°C) bir egzoz kanalı ile atık ısı kazanına iletilir. Egzoz gazları ısılarını burada su buhar çevrimine transfer ederek soğur ve daha sonra kazan bacasından atmosfere atılır. Atık ısı kazanında üretilerek türbine verilen buhar, türbin kademelerinde genişler ve böylece termik enerji mekanik enerjiye dönüşmüş olur. Türbinin tahrik edilmesi sonucu türbine bağlı jeneratörden elektrik ve ısı enerjisi üretilir. Atık ısı kazanından düşük sıcaklıkta atılan egzoz gazı absorpsiyonlu

(LiBr- H_2O) soğutma çevrimine verilir (Kakilli 2003).

Absorberden çıkıp bir pompa vasıtasıyla eriyik ısı değiştiricisinden geçerek bir miktar ısınan eriyik jeneratöre gelir. Burada atık ısı kazanından gelen egzoz gazı ısısıyla soğutucu akışkan buharlaşarak eriyikten ayrışır. Buharlaşarak jeneratörü terk eden soğutkan buharı, yoğuşturucuya girer. Jeneratörde, eriyik içinden soğutkan buharının ayrılmasıyla soğutucu akışkanca zenginleşen eriyik, ısı değiştiricisinden geçerek absorbere geri döner. Yoğuşturucuya giren soğutkan buharı, burada yoğuşarak sıvı hale gelir. Yoğuşturucudan tamamen yoğuşmuş olarak çıkan soğutucu akışkan, genleşme valfinden geçerek buharlaştırıcıya ulaşır. Buharlaştırıcıda, soğutucu akışkan buharlaşarak gerekli soğutma yükünü ortamdan çeker. Buharlaştırıcıdan çıkan soğutkan buharı, absorbere gelir. Absorbere gelen soğutkan buharı, jeneratörden gelen eriyik tarafından absorbe edilir. Absorberde, soğutucu akışkan miktarınca zenginleşen eriyik, bir pompa vasıtasıyla tekrar jeneratöre gönderilir ve çevrim böylece devam eder (Şencan 2004).



Şekil 2.13. Gaz türbinli trijenerasyon tesisinin şematik görünümü

2.8.2. Trijenerasyon sisteminin elemanları

Trijenerasyon sistemini oluşturan başlıca elemanlar şunlardır:

Gaz türbini: Gaz türbinleri son yıllarda büyük ölçekli kojenerasyon sistemlerinde genellikle 1-100 MW elektriksel güç üretimi ile en çok kullanılan güç üreticiler olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Gaz türbini temelli bir sistemi var olan bir sisteme entegre etmek, yüksek basınçlı kazan ve buhar türbininden oluşan sistemi entegre etmeye göre çok daha kolaydır. Gaz türbinleri, az yer kaplaması, modern cihazların artan güvenlikleri ve azalan yatırım maliyetleri ile optimum seçim olarak karşımıza çıkmaktadır.

Gaz türbinlerinde, yanma havası, yanma odasına türbin ile aynı shafta bağlı olarak çalışan bir kompresörle basınçlandırılarak gönderilir. Böylece yakıt yüksek basınç altında yakılır. Çok yüksek sıcaklıktaki (900-1200°C) yanma ürünü gazları türbin içinden geçerken türbin kanatlarını ve dolayısıyla bağlı oldukları shaftı döndürür ve böylece mekanik enerji elde edilmiş olur. Türbinden egzoz edilen gazlarda kalan enerji kullanım alanındaki ısı ihtiyaçlarının bir kısmını veya tamamını karşılamak amacıyla kullanılmaktadır (Sancar 2010).

Yanma odasındaki yüksek sıcaklıktaki atık gazlar daha sonra buradan türbine iletilir. Türbinde atık gaz belirli bir basınca kadar genişler. Türbinde, atık gaz enerjisi, kinetik enerjiye ve daha sonra da mekanik enerjiye dönüştürülür. Türbinde açığa çıkan ısı, kimi zaman üçte ikisi mertebesine erişebilen büyük bir miktarı kompresörü tahrik etmekte kullanılır. Geri kalan mekanik iş elektrik jeneratöründe kullanılır. Türbin çıkışındaki egzoz gazları 400-550°C arasında değişen değerlere sahiptir. Çoğu uygulamada, kompresör ve türbin aynı mil üzerine yerleştirilir. Bu tip türbinler genel olarak sabit hızdaki operasyonlarda kullanılır (Arat 2006).

Kompresör: Düşük sıcaklıktaki hava kompresörde izantropik olarak sıkıştırılır ve yakıtla yanması için düşük sıcaklıkta ve yüksek basınçta yanma odasına gönderilir.

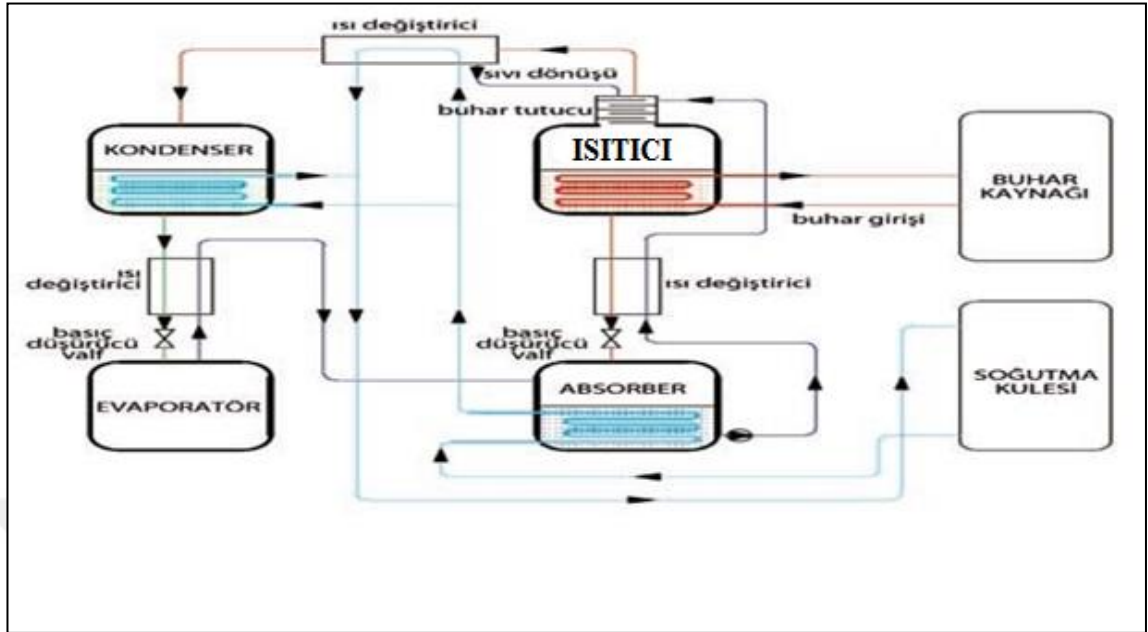
Yanma odası: Kompresörde izantropik olarak sıkıştırılmış düşük sıcaklıktaki hava, yanma odasına püskürtülerek yakıtla yanması sağlanır ve yüksek sıcaklıkta gaz türbinine gönderilir.

Atık ısı kazanı: Türbinde mil gücüne dönüşmeyen ısı enerjisi egzoz gazlarıyla doğrudan proses uygulamalarında (kurutma vs.) kullanılabileceği gibi atık ısı kazanına gönderilerek buhar veya kızgın sıcak su üretimi yapılabilir. Atık ısı kazanı, kompresörden çıkan havayı ısıtmak için kullanılan bir eşanjördür. Türbinden çıkan egzoz gazı, atık ısı kazanına girmeden önce reküperatörden geçirilir. Türbinler fazla hava ile çalıştığından egzoz gazı oksijence zengindir ve kanal tipi bir yakıcıda ilave yakıt yakılarak ısı miktarı artırılabilir. Böylece, egzoz gazındaki enerjinin bir kısmı reküperatörde kullanılır (Akdeniz 2007).

Kondenser: Kondenserde, soğutucu su ile su buharı yoğuşturulur. Yoğuşturulacak su buharı, yoğusturucuya sıkıştırılmış sıvı veya kızgın buhar olarak değil, sadece doymuş buhar olarak girmelidir (Ilık 2012).

2.8.3. Absorpsiyonlu soğutma

Absorpsiyonlu soğutma işleminde (Şekil 2.14), soğutucu akışkan ikinci bir akışkan içerisinde soğutulur. Bu sistemlerde soğutucu akışkan olarak amonyak (NH_3) kullanılırken, soğurulan akışkan sudur. Bazı absorpsiyonlu soğutma sistemlerinde ise su soğutucu akışkan olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler su-lityum bromür ($\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr}$) ve su-lityum klorür ($\text{H}_2\text{O} + \text{LiCl}$) çiftlerinden oluşmaktadır.



Şekil 2.14. Absorpsiyonlu soğutma çevrimi (Anonim 2018a)

Soğurma mekanizması içerisinde, soğurucu, pompa, ısıtıcı, ısı değiştirici, kısılma vanası ve ayırıcı elemanları mevcuttur. Bütün bu elemanlar NH_3 'ün basıncını yükseltmek için bir araya getirilmişlerdir. Basıncı yükselen NH_3 kondenserde soğutularak yoğunlaştırılmakta, buharlaştırıcı basıncına kısılmakta ve buharlaştırıcıdan geçerken ortamdan ısı çekmektedir. Amonyak buharı buharlaştırıcıdan çıktıktan sonra soğurucuya girer ve su içinde soğurularak $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ çözeltisini oluşturur. Soğurucudan ısı çekilerek, soğurulabilen NH_3 miktarı artırılır. Daha sonra çözelti ısıtıcıya pompalanır. Burada çözelti, dış kaynaktan çekilen ısıyla buharlaştırılır ve ayırıcıya iletilir. Burada su, amonyakça zengin olan buhardan ayrılarak ısıtıcıya geri döner, saf amonyak buharı ise yoğunlaştırucuya geçerek çevrimi sürdürür. Isıtıcıda kalan, amonyakça zayıf çözelti, bir ısı değiştiriciden geçerek pompadan çıkan çözeltiye bir miktar ısı verir ve daha sonra soğurucu basıncına kısıılır (Öztürk ve Kaya 2014).

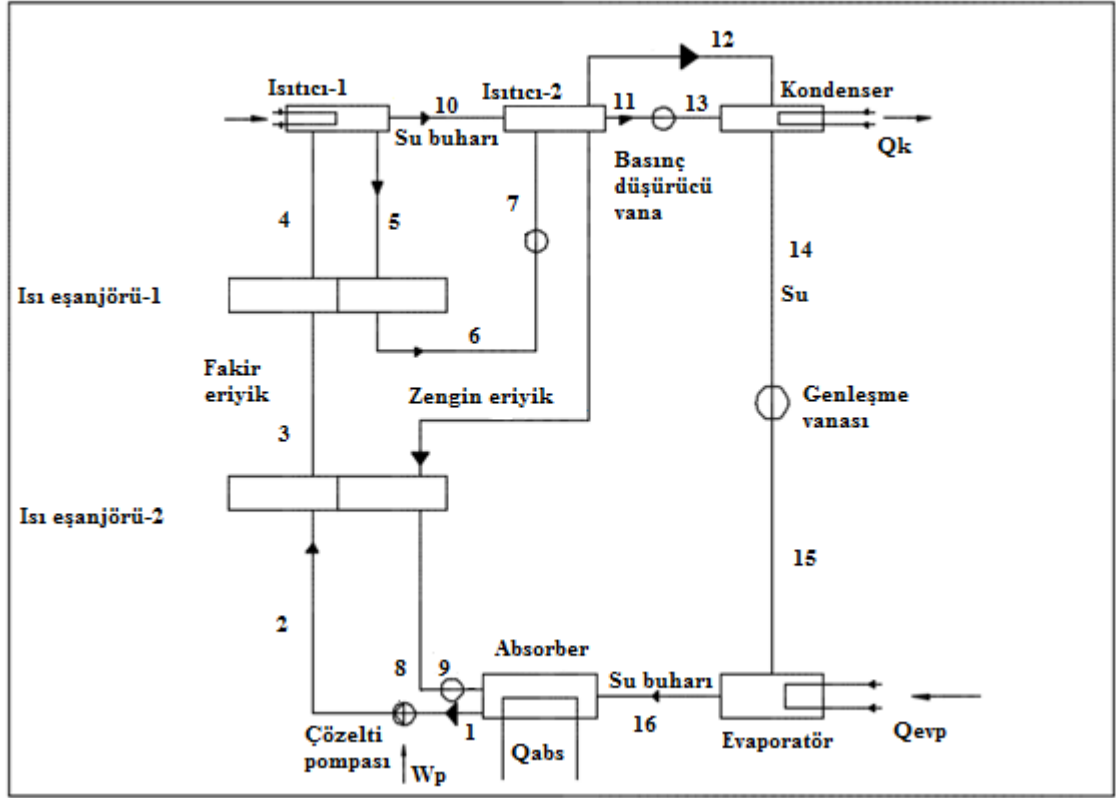
2.8.3.1. Tek etkili absorpsiyonlu soğutma

Genellikle, tek etkili absorpsiyonlu soğutma sistemi atık buhar, baca gazı ve sıcak su enerjilerinin bulunduğu işletmeler için uygundur. absorpsiyonlu soğutucuların

Tek etkili absorpsiyonlu soğutma sistemi, baca gazından elde edilen enerji ile çalışmaktadır. Absorberden zayıf eriyik pompası vasıtasıyla jeneratöre pompalanan %55-60 oranındaki zayıf LiBr eriyiği, baca gazı aracılığı ile yaklaşık 85-95°C sıcaklığa kadar ısıtılan yeterli debideki su ile ısıtılmakta ve eriyik içerisindeki soğutucu akışkan su, ayrıştırılmaktadır. Ayrışan su, yoğuşturucuya gitmektedir. Diğer taraftan jeneratördeki zengin eriyik, zengin eriyik pompası aracılığı ile ısı değiştiriciden geçirilerek absorbere gönderilmektedir. Yoğuşturucuya giden soğutucu akışkan su, burada soğutma kulesinden absorbere, oradan kondensere gelen soğutma kulesi suyu ile yoğuşmaktadır. Yoğuşan 40°C soğutucu akışkan su, kondenserden sıvı olarak çıkmakta ve sifon yardımı ile evaporatöre iletilmektedir. Evaporatördeki bu su, akışkan su pompası ile nozullardan pulverize edilerek basıncı (8,1 mbar) düşürülmekte ve 4°C’de buharlaşmaktadır. Buharlaştırılan bu su ile endüstriyel soğutma işlemleri veya klima uygulamaları için kullanılan 12-13°C dönüş suyu, 6-7°C’ye kadar soğutulmaktadır.

2.8.3.2. Çift etkili absorpsiyonlu soğutma

Çift etkili absorpsiyonlu soğutucu (Şekil 2.16); 1. kademe jeneratör, 2. kademe jeneratör, evaporatör, absorber, kondenser, ve ısı değiştiriciler gibi temel elemanlardan meydana gelmektedir. Bunların yanı sıra sistemde, akışkan pompası ve hız kontrollü eriyik pompaları da mevcuttur. Tek etkililerle kıyaslandığında çift etkili absorpsiyonlu su soğutma gruplarında, yüksek basınçlı buhar ve ikinci kademe jeneratör kullanılması aralarındaki en temel farktır. EER (Enerji verimlilik oranı) değeri 1,3-1,5 arasında değişkenlik göstermektedir. Fakat çift etkililer, aynı kapasite için tek etkili absorpsiyonlu su soğutma gruplarına kıyasla, ilk yatırım maliyeti açısından ortalama %40 ile %50 arasında daha pahalı olmaktadır. Çift etkili sistemlerde buhar basıncının yüksek olması gerekmektedir. En düşük buhar basıncının 400 kPa (4 bar), ideal buhar basıncının ise 700 kPa (7 bar) ile 900 kPa (9 bar) arasında olması gerekmektedir.



Şekil 2.16. Çift etkili absorpsiyonlu soğutma sistemi şeması

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada, Erzurum şartlarındaki bir işletme için kojenerasyon sistemi tasarlanmış ve bu sistemin fizibilite raporu hazırlanmıştır. Ayrıca, Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için trijenerasyon sisteminin uygulanabilirliği araştırılmış ve maliyet analizi yapılarak geri ödeme süresi belirlenmiştir. Her iki işletme için elektrik, ısıtma ve soğutma ihtiyaçları belirlenmiş ve ona göre sistem tayini yapılmıştır.

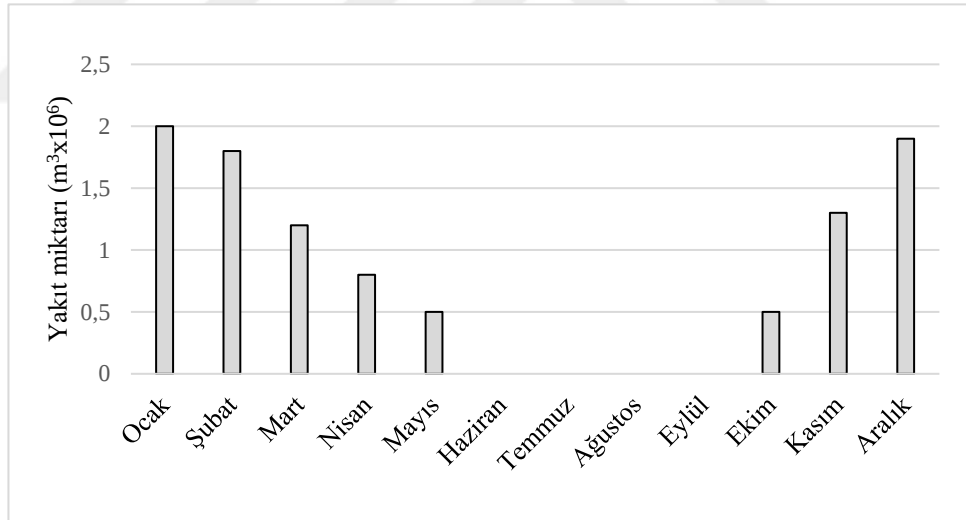
3.1. Erzurum Şartlarında Örnek Birimin Isıl Enerji İhtiyacı

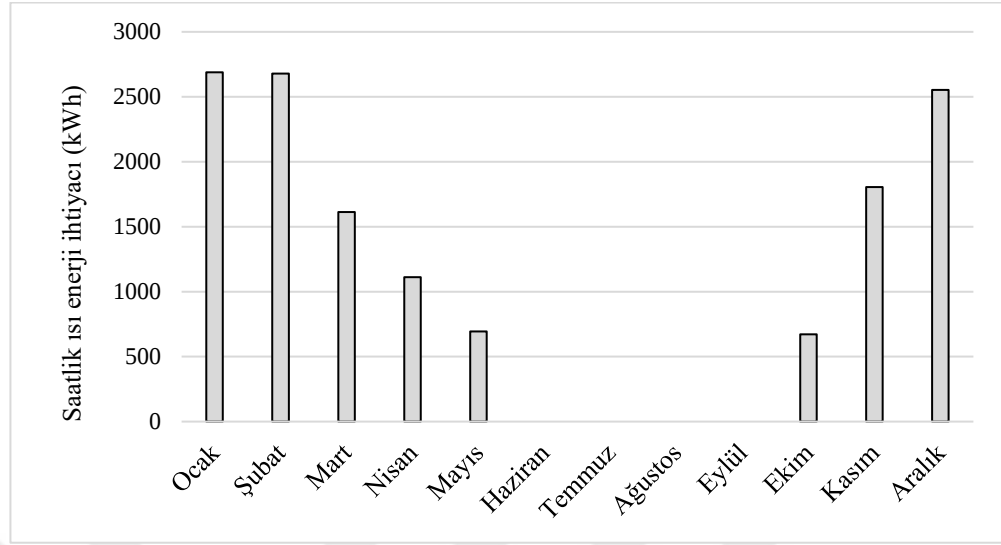
Türkiye'nin en soğuk illerinden biri olan Erzurum'da kış ayları uzun ve karlı, yaz ayları ise kısa ve kurak geçmektedir. Erzurum'da yıllık ortalama sıcaklık 5,9°C'dir. Yıllık en yüksek sıcaklık Temmuz ve Ağustos aylarında görülmekte, Erzurum merkezde sıcaklıklar Temmuz ayında 32,2°C, Ağustos'ta ise 34°C'ye kadar ulaşmaktadır. En düşük sıcaklık Aralık, Ocak ve Şubat aylarında görülmekte ve Aralık'ta -28°C'ye, Ocak ve Şubat aylarında ise -30°C'ye kadar düşmektedir. Erzurum ilinde en soğuk ay ortalaması -10,8°C, en sıcak ay ortalaması ise 19,1°C'dir (Bakırcı vd 2006).

Erzurum şartlarında, yılda 7-8 ay ısıtma yüküne bağlı olarak yıllık toplam ısı enerjisi miktarı 100 GWh olduğu bir birimde, yakıt (doğalgaz) miktarı $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ olup yaklaşık maliyeti 13 Milyon TL civarındadır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Örnek birimin aylara göre doğalgaz tüketimi ve maliyetleri (1,26 TL/ m3)

Aylar	Yakıt (m ³ /ay)	Enerji (MWh/ay)	Enerji Maliyeti (TL)	Anlık ısıl enerji ihtiyacı (kW)
Ocak	2.000.000	19.180	2.520.000	2.688
Şubat	1.800.000	17.260	2.268.000	2.678
Mart	1.200.000	11.500	1.512.000	1.612
Nisan	800.000	7.670	1.008.000	1.111
Mayıs	500.000	4.780	630.000	694
Haziran	-	-	-	-
Temmuz	-	-	-	-
Ağustos	-	-	-	-
Eylül	-	-	-	-
Ekim	500.000	4.780	630.000	672
Kasım	1.300.000	12.460	1.638.000	1.805
Aralık	1.900.000	18.220	2.394.000	2.554
Toplam	10.000.000	95.85	12.600.000	13.817

**Şekil 3.1.** Örnek birimin aylara göre yakıt (doğalgaz) tüketimi



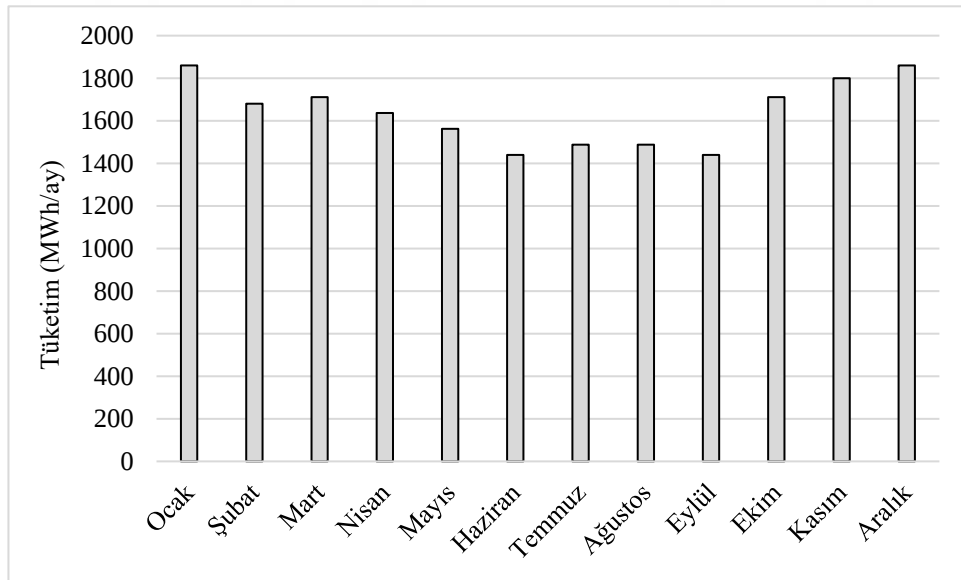
Şekil 3.2. Örnek birimin aylara göre saatlik ısı enerjisi ihtiyacı

3.2. Erzurum Şartlarındaki İşletmenin Elektrik Enerjisi İhtiyaçları

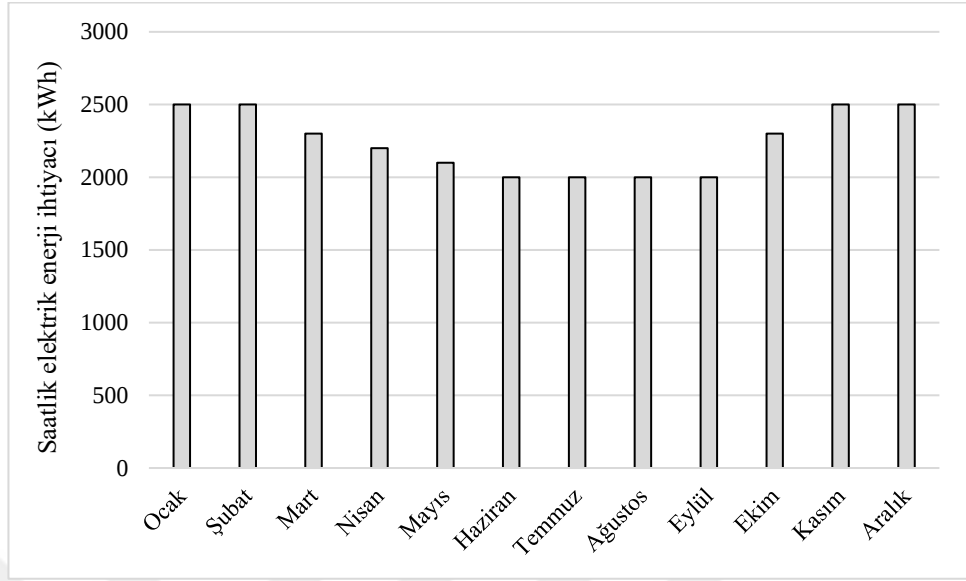
Elektrik enerji ihtiyaçları örnek birimin aylara göre tüketimleri, maliyetleri ve saatlik elektrik enerjisi ihtiyaçları hesaplanmıştır. Elektrik enerjisi ihtiyacı en fazla kış aylarında görülmektedir. Bu durum, ısıtma sezonunda kullanılan sirkülasyon pompalarından kaynaklanmaktadır. Saatlik elektrik enerjisi ihtiyacının en düşük olduğu aylar yaz aylarıdır. Örnek birimin saatlik elektrik enerjisi ihtiyacı 2000 kWh olup, aylık tüketimi ve maliyetleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Örnek birimin aylara göre elektrik tüketimi ve maliyetleri (0,4282 TL/kWh)

Aylar	Anlık tüketim (kW)	Tüketim (MWh/ay)	Aylık tutar (TL/ay)
Ocak	2.500	1.860	796.452
Şubat	2.500	1.680	719.376
Mart	2.300	1.711	732.735
Nisan	2.200	1.637	700.878
Mayıs	2.100	1.562	669.019
Haziran	2.000	1.440	616.808
Temmuz	2.000	1.488	637.162
Ağustos	2.000	1.488	637.162
Eylül	2.000	1.440	616.608
Ekim	2.300	1.711	732.735
Kasım	2.500	1.800	770.760
Aralık	2.500	1.860	796.452
Toplam	26.900	19.677	8.425.948



Şekil 3.3. Örnek birimin aylara göre elektrik tüketimi



Şekil 3.4. Örnek birimin aylara göre saatlik elektrik tüketimi

Kojenerasyon sistemleri için elektrik gücü belirlenirken genellikle yıllık ortalama saatlik elektrik tüketimi dikkate alınmaktadır. Ancak, yıllık ortalama saatlik elektrik miktarı dikkate alındığında hassas sonuçlar elde edilmediği için, gaz motoru seçimi yapılırken yıllık ortalama yerine anlık elektrik tüketimi göz önüne alınmalıdır. Çizelge 3.2’den anlık ortalama değer 2000 kW olduğu anlaşılmaktadır. Bu verilere göre 2 MW gücünde gaz motoru seçimi uygun olmaktadır. Motor seçimi yapıldıktan sonra, seçilen motora göre fizibilite çalışması yapılarak geri ödeme süresi belirlenmelidir.

3.3. Kojenerasyon Santrali

Erzurum şartlarında örnek birimin sadece Temmuz ve Ağustos aylarında soğutma ihtiyacı bulunmaktadır. İlgili birimde ek bir soğutma yüküne ihtiyaç yoksa soğutma ihtiyaçlarının az olması nedeniyle trijenerasyon sistemi ekonomik olmayacaktır. Çünkü kojenerasyon sistemine ek olarak kurulan absorpsiyonlu soğutma ünitesinin maliyeti oldukça yüksektir. Ayrıca, absorpsiyonlu soğutma ünitesinin kurulması için yılda en az 6 ay soğutma yapılmalıdır. Bu doğrultuda yapılan araştırmalar sonucu örnek birimde 2 MW gücünde CG170-16 motorlu kojenerasyon sistemi uygun görülmüş ve motorun teknik özellikleri Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.3. CG170-16 (2 MW) motorunun teknik özellikleri

Motor tipi	CG170-16
Elektrik çıkış gücü	2000 kW
Ceket ısı gücü	1005 kW
Egzoz Isı Gücü	972 kW
Ara soğutucu (intercooler)	178 kW
Yakıt türü	Doğalgaz
Yakıt tüketimi	477 m ³ /h
İç tüketim	120 kW/h
Elektriksel verim	43,7%
Isıl verim	43,2%
Toplam verim	86,9%

3.3.1. Kojenerasyon santralinin enerji analizi

Seçilen motorun teknik özelliklerinden faydalanılarak ve bazı kabuller yapılarak, sistemin yakıt tüketimi, aylık yakıt tüketimi, üretilen elektrik miktarı, kojenerasyonda üretilen sıcak su hesaplanabilir. Hesaplama için yapılan kabuller, ilgili firmaların elektrik ve doğalgaz birim maliyetleri, sistemin çalışma süresi ve Euro para biriminin o zaman dilimi için eş değer TL değeridir.

$$\text{Aylık yakıt tüketimi (m}^3\text{/ay)} = \text{Yakıt Tüketimi} \times \text{Aylık Çalışma Süresi} \quad (3.1)$$

$$\text{Üretilen net elektrik miktarı (kWh/ay)} = \text{Motor Gücü} \times \text{Aylık Çalışma Süresi} \quad (3.2)$$

$$\text{Sistemdeki atık ısı miktarı (kW)} = \text{Ceket Isı Gücü} + \text{Egzoz Isı Gücü} \quad (3.3)$$

3.3.2. Kojenerasyon santralindeki mali hesaplamalar

Maliyet hesaplamaları yapılırken, santralin yatırım miktarı belirlenip işletme gelirleri, işletme giderleri ve yıllık santral geliri hesaplanarak sistemin geri ödeme süresi bulunmalıdır. Santralde işletme gelirleri, elektrik ve ısı geliri olurken, işletme giderleri yakıt, yağlama yağı ve bakım giderleridir.

$$\text{Sistemin elektrik birim maliyeti (TL/kWh)} = (\text{Yakıt Tüketimi} \times \text{Yakıtın Birim Fiyatı}) / \text{Üretilen Net Elektrik Miktarı} \quad (3.4)$$

$$\text{Elektrik birim maliyeti (bakım sarfiyatı ve yağ dahil) (TL/kWh)} = \text{Sistemin Elektrik Birim Maliyeti} + (\text{Servis ve Yedek Parça Fiyatı/Sistemin Üreteceği Elektrik Gücü}) + (\text{İç Tüketim} \times \text{Sistemin Elektrik Birim Maliyeti/Sisteminin Üreteceği Elektrik Gücü}) \quad (3.5)$$

$$\text{İşletmenin aylık elektrik maliyeti (TL/ay)} = \text{Sisteminin Üreteceği Elektrik Gücü} \times \text{Aylık Çalışma Süresi} \times \text{Elektrik Birim Fiyatı} \quad (3.6)$$

$$\text{Sistemde Üretilen elektrik maliyeti (TL/ay)} = \text{Sisteminin Üreteceği Elektrik Gücü} \times \text{Aylık Çalışma Süresi} \times \text{Kojenerasyon Sistemi Elektrik Birim Maliyeti} \quad (3.7)$$

$$\text{Tesisin elektrik getirisi (TL/ay)} = \text{İşletmenin Aylık Elektrik Maliyeti} - \text{Sistemde Üretilen Elektrik Maliyeti} \quad (3.8)$$

$$\text{Isıtma için harcanmayacak gaz maliyeti (TL/ay)} = (\text{Sistemdeki Atık Isı Miktarı} \times 860 / 8250) \times \text{Aylık Çalışma Süresi} \times \text{Yakıtın Birim Fiyatı} \quad (3.9)$$

$$\text{Servis yedek parça gideri (TL/ay)} = \text{Servis ve Yedek Parça Fiyatı} \times \text{Aylık Çalışma Süresi} \quad (3.10)$$

$$\text{İç tüketim gideri (TL/ay)} = \text{Sistemin Elektrik Birim Maliyeti} \times \text{İç Tüketim} \times \text{Aylık Çalışma Süresi} \quad (3.11)$$

$$\text{Sistemin aylık kazancı (TL/ay)} = \text{Tesisin Elektrik Getirisi} + \text{Isıtma İçin Harcanmayacak Gaz Maliyeti} - (\text{Servis Yedek Parça Gideri} + \text{İç Tüketim Gideri}) \quad (3.12)$$

$$\text{Yatırım maliyeti (G}_y\text{)} = \text{İlgili firmalardan alınan teklif değeridir.}$$

$$\text{Dinamik geri ödeme süresi (yıl)} = \frac{\ln \frac{G_i}{G_i - G_y f}}{\ln(1+f)} \quad (3.13)$$

Burada G_i toplam yıllık kazanç, G_y yatırım maliyeti (€), f yıllık faiz oranıdır.

$$\text{Statik geri ödeme süresi (yıl)} = \text{Yatırım Maliyeti} / \text{Toplam Yıllık Kazanç} \quad (3.14)$$



Şekil 3.5. Erzurum Kombina Tesis, idari bina, sosyal tesisler ve lojmanlar

3.4. Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin Isı Enerjisi İhtiyaçları

Erzurum Kombina Tesis, idari bina, sosyal tesisler ve lojmanların görünümü Şekil 3.5'te verilmiştir. Erzurum Kombina Tesis ısı ihtiyacı kazan dairesinde, sosyal tesiste ve lojmanlarda bulunan kazanlar aracılığıyla karşılanmaktadır. Sosyal tesiste 3 adet,

kazan dairesinde 6 adet ve lojmanlarda 2 adet doğalgazlı yoğuşmalı kazan olmak üzere toplamda 11 adet kazan bulunmaktadır (Şekil 3.6). Bu kazanlar ile elde edilen sıcak su, pompalar vasıtasıyla ilgili binalara ulaştırılmaktadır.

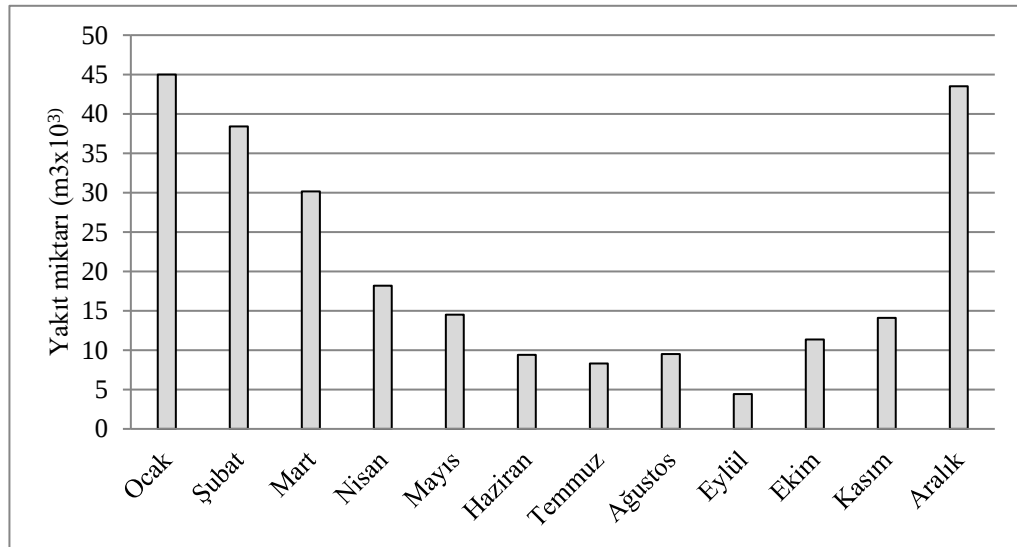


Şekil 3.6. Erzurum Kombina Tesisinde ısıtma için kullanılan ekipmanlar

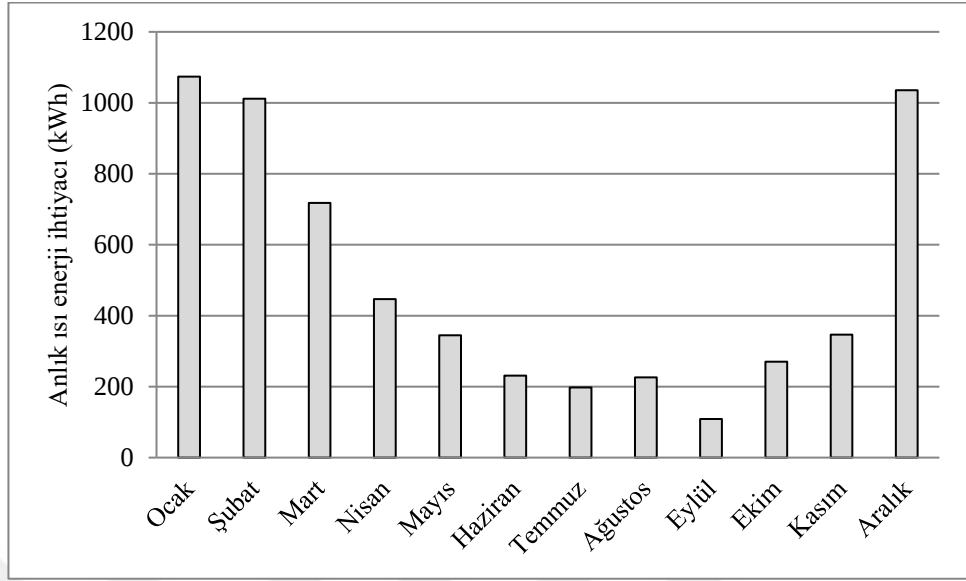
Erzurum Kombina Tesisinin 2017 ve 2018 yılında tükettiği toplam ısı enerjisi miktarı 2368471 kWh/yıl ve katma değer vergisi dahil maliyeti 282205 TL/yıl'dır. Burada ısı enerjisi, kullanılan yakıt miktarı ile yakıtın alt ısı değeri çarpılarak, maliyeti ise kullanılan yakıt miktarı ile katma değer vergisi dahil birim fiyatı çarpılarak hesaplanmıştır (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4. Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin 2017 ve 2018 yılında aylara göre doğalgaz tüketimi ve maliyetleri

Aylar	Yakıt (m ³ /ay)	Enerji miktarı (kWh/ay)	Yakıt maliyeti (TL/ay)	Anlık enerji ihtiyacı (kW)
Ocak	45.131	432.806	56.881	$432.806/(13 \times 31)=1.074$
Şubat	38.400	368.256	44.304	1.012
Mart	30.164	289.273	35.358	718
Nisan	18.175	174.298	20.248	447
Mayıs	14.495	139.007	16.809	345
Haziran	9.404	90.184	11.187	231
Temmuz	8.300	79.597	9.874	198
Ağustos	9.500	91.105	11.301	226
Eylül	4.424	42.426	4.420	109
Ekim	11.359	108.933	13.090	270
Kasım	14.100	135.219	13.956	347
Aralık	43.521	417.366	44.777	1.036
Toplam	246.973	2.368.471	282.205	6.012



Şekil 3.7. Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin aylara göre yakıt (doğalgaz) tüketimi



Şekil 3.8. Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin aylara göre anlık ısı enerjisi ihtiyacı

3.5. Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin Elektrik Enerjisi İhtiyaçları

Erzurum Kombina Tesisi elektrik enerjisi ihtiyaçlarını trafolar yardımı ile şebekeden sağlamaktadır. Şebekeden gelen elektrik trafo 1'e gelir ve buradan ayrılarak tesis içerisine erişim sağlanır. Tesis içerisine erişimi sağlayan ekipmanlar Şekil 3.5'te verilmiştir.

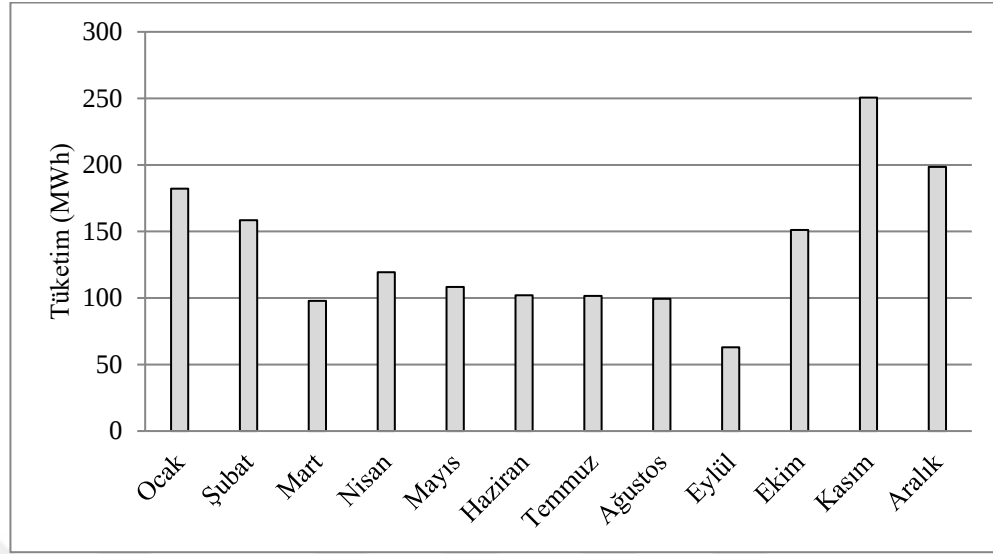


Şekil 3.9. Erzurum Kombina Tesisinin elektrik ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılan ekipmanlar

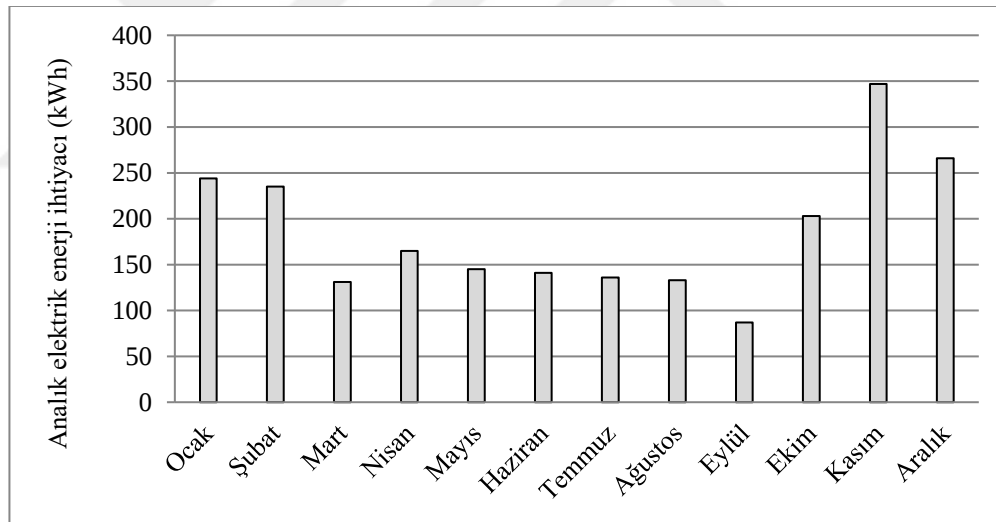
Çizelge 3.5. Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin 2017 yılında aylara göre elektrik tüketimi ve maliyetleri

Aylar	Tüketim (kWh)	Tutar (TL)	Anlık elektrik tüketimi (kW)	Tam kapasitede anlık elektrik tüketimi (kWh)
Ocak	182.160	77.936	244	500
Şubat	158.500	67.813	235	500
Mart	97.872	42.047	131	500
Nisan	119.402	52.634	165	450
Mayıs	108.320	47.749	145	450
Haziran	102.100	45.007	141	430
Temmuz	101.520	43.435	136	430
Ağustos	99.400	42.528	133	430
Eylül	62.955	27.729	87	430
Ekim	151.170	59.557	203	500
Kasım	250.559	110.205	347	500
Aralık	198.500	79.755	266	500
Toplam	1.632.458	696.394		
Ortalama			186	468

Elektrik enerji ihtiyaçları Erzurum Kombina Tesisinin enerji şefliğinden alınmış, aylara göre tüketimler, maliyetleri ve saatlik elektrik enerjisi ihtiyaçları hesaplanmıştır. Elektrik enerjisi ihtiyacı en fazla olan ay Kasım ayı olup en düşük olduğu ay Eylül ayıdır. Eylül ayında düşük olmasının nedeni, tesisin bu ayda yeni yerine taşınmasından kaynaklanmaktadır. 2017 ve 2018 yılında elektrik enerjisi tüketimi 1632458 kWh ve maliyeti katma değer vergisi dahil 696394 TL'dir (Çizelge 3.5).



Şekil 3.10. Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin aylara göre elektrik tüketimi



Şekil 3.11. Et ve Süt Kurumu Erzurum Kombina Tesisinin aylara göre saatlik elektrik tüketimi

Bir önceki kojenerasyon sistem seçiminde belirttiğimiz gibi gaz motoru seçilirken yıllık ortalama yerine anlık elektrik tüketimi göz önüne alınmalıdır. Sistem tam kapasite çalıştırıldığında anlık elektrik tüketiminin yaklaşık olarak 500 kWh civarında olduğu kabul edilerek 500 kWh gücünde gaz motorlu trijenerasyon sistemi seçilmiştir.

Ayrıca Erzurum Kombina tesisinin düşük sıcaklıklarda (-20°C gibi) sürekli soğutma ihtiyaçları bulunmaktadır. Tesiste ürünlerin bulunduğu alanlar -15°C sıcaklıkta tutulmaktadır. Bu alanları bu kadar düşük sıcaklıkta tutabilmek için derinlemesine soğutma yapabilen buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi kullanılmaktadır. Oysa kojenerasyon sistemine ek olarak kullanılan absorpsiyonlu soğutma ünitesinde bu şekildeki düşük sıcaklıklar elde edilememektedir. Bu nedenle kurulacak olan absorpsiyonlu soğutma ünitesinin sosyal tesis, idari bina ve lojmanları soğutmak için kullanılması öngörülmüştür.

3.6. Trijenerasyon Santrali

Yapılan araştırmalar sonucu 526 kW gücünde JMS 312 Jenbacher motorlu trijenerasyon sistemi uygun görülmüş ve motorun teknik özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. JMS 312 Jenbacher (526 kW) motorunun teknik özellikleri

Motor Tipi	JMS 312 Jenbacher
Elektrik Çıkış Gücü	526 kW
Atık Isı Gücü	659 kW
Yakıt Türü	Doğalgaz
Yakıt Tüketimi	143 m ³ /h
Elektriksel Verim	38,6%
Isıl Verim	48,4%
Toplam Verim	86,9%

3.6.1. Trijenerasyon santralinin enerji analizi

Seçilen motorun teknik özelliklerinden faydalanılarak ve bazı kabuller yapılarak, sistemin yakıt tüketimi, aylık yakıt tüketimi (Denklem 3.1) ve üretilen elektrik miktarı (Denklem 3.2) hesaplanabilir.

3.6.2. Trijenerasyon santralindeki mali hesaplamalar

Maliyet hesaplamaları yapılırken, santralin yatırım miktarı belirlenip işletme gelirleri, işletme giderleri ve yıllık santral geliri hesaplanarak sistem geri ödeme süresi bulunmalıdır. Santralde işletme gelirleri, elektrik ve ısı geliri olurken, işletme giderleri doğalgaz gideri, yağlama yağı gideri ve bakım giderleridir.

Trijenerasyon sistemi elektrik birim maliyeti Denklem 3.4, elektrik birim maliyeti (bakım sarfıyatı ve yağ dahil) Denklem 3.5, Erzurum Kombina Tesisinin aylık elektrik maliyeti Denklem 3.6, trijenerasyonda üretilen elektrik maliyeti Denklem 3.7, trijenerasyon tesisinin elektrik getirisi Denklem 3.8, ısıtma için harcanmayacak gaz maliyeti Denklem 3.9, servis yedek parça gideri Denklem 3.10 ve iç tüketim gideri Denklem 3.11'den hesaplanmıştır.

$$\text{Sistemin aylık soğutma maliyeti (TL/ay)} = \text{Absorpsiyonlu sisteminin soğutma yükü} \times \text{Elektrik birim maliyeti} \times \text{Aylık Çalışma Süresi} \quad (3.15)$$

$$\text{Trijenerasyon Sisteminin Soğutma Getirisi (TL/ay)} = \text{Soğutma Yüğü} \times \text{Trijenerasyonda Üretilen Elektrik Maliyeti} \times \text{Aylık Çalışma Süresi} \quad (3.16)$$

$$\text{Soğutma için harcanmayacak elektrik maliyeti (TL/ay)} = \text{Erzurum Kombina Tesisinin Aylık Soğutma Maliyeti} - \text{Trijenerasyon Sisteminin Soğutma Getirisi} \quad (3.17)$$

$$\text{Trijenerasyon sistemi aylık kazancı (TL/ay)} = \text{Trijenerasyon Tesisinin Elektrik Getirisi} + \text{Isıtma İçin Harcanmayacak Gaz Maliyeti} + \text{Trijenerasyon Sisteminin Soğutma Getirisi} - (\text{Servis Yedek Parça Gideri} + \text{İç Tüketim Gideri}) \quad (3.18)$$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Erzurum şartlarındaki örnek birimin 2 MW gücündeki kojenerasyon santrali hesaplamaları için kullanılan bazı kabuller Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelgede verilen elektrik değeri www.arasedas.com adresinden ve doğalgaz değeri www.palen.com.tr adresinden alınmıştır. Hesaplamalar Ocak ayı baz alınarak yapılmış ve diğer ayların hesaplamaları **EK 1**’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.1. 2 MW gaz motorlu kojenerasyon santrali hesaplarında kullanılan kabuller

1 Euro	5,5 TL
1 kWh Elektrik	0,4282 TL (0,078 €)
Doğalgaz (m ³)	1,26 TL (0,229 €)
Çalışma Süresi (ay)	390 h

4.1. Kojenerasyon Santralinin Enerji Analizi Sonuçları

Denklem 3.1’e göre;

$$\text{Aylık yakıt tüketimi} = 477 \text{ (m}^3\text{/h)} \times 390 \text{ (h/ay)} = 186030 \text{ m}^3\text{/ay}$$

Denklem 3.2’ye göre;

$$\text{Üretilen net elektrik enerjisi miktarı} = 2000 \text{ (kW)} \times 390 \text{ (h/ay)} = 780000 \text{ kWh/ay}$$

Denklem 3.3’e göre;

$$\text{Kojenerasyondaki atık ısı miktarı} = 1005 \text{ (kW)} + 972 \text{ (kW)} = 1977 \text{ kW}$$

4.2. Kojenerasyon Santralinin Mali Sonuçları

Denklem 3.4'e göre;

$$\text{Kojenerasyon sistemi elektrik birim maliyeti} = (477 \text{ (m}^3\text{/h)} / 2000 \text{ (kW)}) \times 1,26 \text{ (TL/m}^3\text{)} = 0,30065 \text{ TL/kWh}$$

Denklem 3.5'e göre;

$$\text{Elektrik birim maliyeti (bakım sarfıyatı ve yağ dahil)} = 0,30065 \text{ (TL/kWh)} + (10 \text{ (€/h)} \times 5,5 \text{ (TL/€)} / 2000 \text{ (kW)}) + (120 \text{ (kW)} \times 0,30065 \text{ (TL/kWh)} / 2000 \text{ (kW)}) = 0,34619 \text{ TL/kWh}$$

Denklem 3.6'ya göre;

$$\text{İşletmenin aylık elektrik maliyeti} = 2000 \text{ (kW)} \times 390 \text{ (h/ay)} \times 0,4282 \text{ (TL/kWh)} = 333996 \text{ TL/ay}$$

Denklem 3.7'ye göre;

$$\text{Kojenerasyonda üretilen elektrik maliyeti} = 2000 \text{ (kW)} \times 390 \text{ (h/ay)} \times 0,30065 \text{ (TL/kWh)} = 234507 \text{ TL/ay}$$

Denklem 3.8'e göre;

$$\text{Kojenerasyon tesisinin elektrik getirisi} = 333996 \text{ (TL/ay)} - 234507 \text{ (TL/ay)} = 99489 \text{ TL/ay}$$

Denklem 3.9'a göre;

$$\text{Isıtma için harcanmayacak gaz maliyeti} = 1977 \text{ (kW)} \times 860 / 8250 \text{ (m}^3\text{/kWh)} \times 390 \text{ (h/ay)} \times 1,26 \text{ (TL/m}^3\text{)} = 101271 \text{ TL/ay}$$

Denklem 3.10'a göre;

$$\text{Servis yedek parça gideri} = 10 \text{ (€/h)} \times 5,5 \text{ (TL/€)} \times 390 \text{ (h/ay)} = 21450 \text{ TL/ay}$$

Denklem 3.11'e göre;

$$\text{İç tüketim gideri} = 0,30065 \text{ (TL/kWh)} \times 120 \text{ (kW)} \times 390 \text{ (h/ay)} = 14070 \text{ TL/ay}$$

Denklem 3.12'ye göre;

$$\text{Kojenerasyon sistemi aylık kazancı (TL)} = 99489 \text{ (TL/ay)} + 101271 \text{ (TL/ay)} - (21450 \text{ (TL/ay)} + 14070 \text{ (TL/ay)}) = 165240 \text{ TL/ay}$$

$$\text{Yatırım maliyeti (G}_y\text{)} = 1.000.000 \text{ €}$$

Denklem 3.13'e göre;

$$\text{Dinamik geri ödeme süresi} = \frac{\ln \frac{360524}{360524 - 1000000 \times 0,0125}}{\ln(1 + 0,0125)} = 2,84 \text{ yıl}$$

Euro için yıllık faiz oranı f , merkez bankasının enflasyona göre belirlediği değer dikkate alınarak %1,25 kabul edilmiştir.

Denklem 3.14'e göre;

$$\text{Statik geri ödeme süresi} = 1.000.000 \text{ (€)} / 360524 \text{ (€/yıl)} = 2,77 \text{ yıl}$$

Yapılan hesaplamalar sonucunda statik geri ödeme süresi, yatırım maliyetinin yıllık toplam kazanca bölünmesi ile bulunmuştur. Tüm hesaplamalar **EK 1**'de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

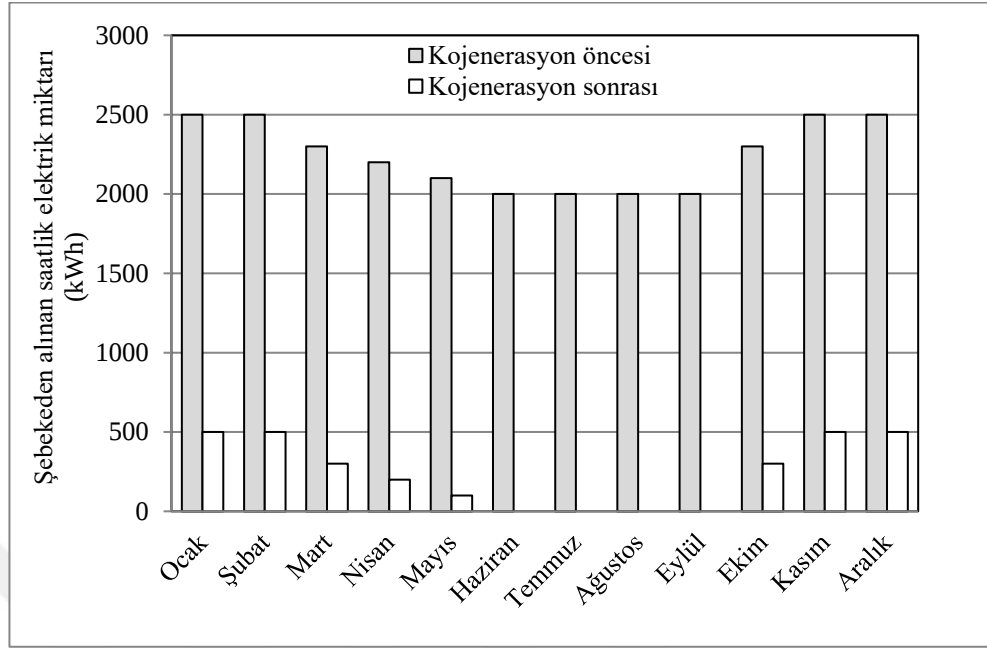
Kojenerasyon sistemi kurulmadan önce Erzurum şartlarındaki işletme için elektrik birim maliyeti 0,4282 TL/kWh'dır. Sistem kurulduktan sonra kojenerasyon sistemi elektrik birim maliyeti 0,30065 TL/kWh'ya düşmektedir. **EK 1**'e göre kojenerasyon sisteminin elektrik getirisi tüm aylarda 99489 TL olmaktadır. Çizege 3.2'de verilen aylara göre anlık tüketimlere bakıldığında yaz aylarında ihtiyaç duyulan anlık elektrik miktarları tamamen kojenerasyon sisteminden karşılanmaktadır. Diğer aylarda ihtiyaç duyulan anlık elektrik miktarlarının 2000 kW'lık kısmı tasarlanan kojenerasyon sisteminden elde edilmektedir. İhtiyaç duyulan anlık elektrik miktarının kojenerasyon sisteminin ürettiği elektrik miktarına oranı sistemin verimliliğini verir. O halde, kojenerasyonda ürettiğimiz anlık elektrik miktarının ne kadarını kullanabilirsek sistemimizin verimliliği o kadar artacak ve elektrik getirisi de o derece fazla olacaktır. Diğer bir deyişle, kojenerasyon sisteminin verimliliği sistemden elde edilen elektrik gücün tamamının kullanılması ilkesine dayanmaktadır.

Örnek birim soğuk iklim bölgesinde yer aldığı için kış aylarında ısıtma ihtiyaçları elektrik ihtiyaçlarından yüksektir. Çizelge 3.1'de işletme için anlık ısı enerjisi ihtiyacının toplam yaklaşık 14 MW olduğu görülmektedir. Yılın sadece 8 ayı ısıtma yapılmaktadır. Aylara göre anlık ısı enerji ihtiyacına bakıldığında seçilen kojenerasyon sistemi bu ihtiyaçların yaklaşık 2 MW'lık kısmını karşılamaktadır. Örnek birim için en uygun kojenerasyon sistemi budur. Çünkü sistemin kâra geçebilmesi için ceket ısının kullanılması gerekir. Eğer kojenerasyon sistemi ısı ihtiyaçları baz alınarak yapılırsa sistem verimsiz olur. Sonuç itibari ile üretilen elektriğin tamamı kullanılmaz ve sürekli zarar edilir.

Çizelge 4.2. Aylara göre kojenerasyon öncesi ve sonrası toplam elektrik ve doğalgaz tutarları ile sistem getirisi

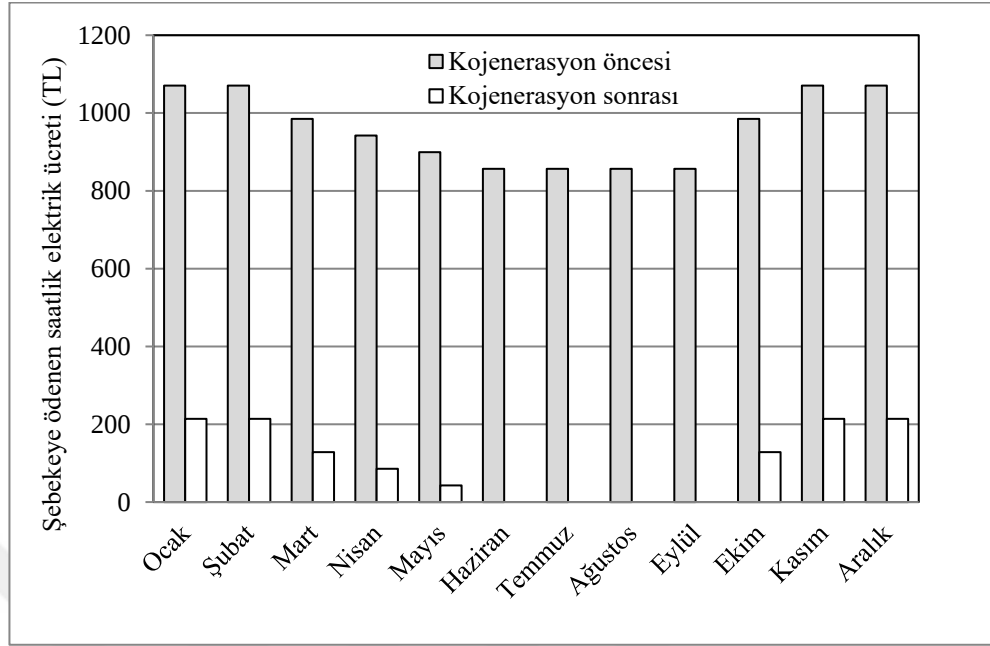
Aylar	Kojenerasyon Sistemi Öncesi			Kojenerasyon Sistemi Sonrası
	Elektrik Tutarı (TL)	Doğalgaz Tutarı (TL)	Elektrik ve Doğalgaz Toplamı (TL)	Elektrik ve Doğalgaz Tutarı (TL)
Ocak	796.402	2.520.000	3.316.402	3.216.913
Şubat	719.376	2.268.000	2.987.376	2.887.887
Mart	732.735	1.512.000	2.244.735	2.145.246
Nisan	700.878	1.008.000	1.708.878	1.609.389
Mayıs	669.019	630.000	1.299.019	1.199.530
Haziran	616.808	0	616.808	517.319
Temmuz	637.162	0	637.162	537.673
Ağustos	637.162	0	637.162	537.673
Eylül	616.808	0	616.808	517.319
Ekim	732.735	630.000	1.362.735	1.263.246
Kasım	770.760	1.638.000	2.408.760	2.309.271
Aralık	796.452	2.394.000	3.190.452	3.090.963
Toplam	8.426.297	12.600.000	21.026.297	19.043.416
Sistemin Getirisi				1.982.881

Erzurum şartlarındaki işletme için hazırlanan fizibilite raporunda yıllık sistem getirisi 1982881 TL'dir. Bu değer, Çizelge 4.2'de teyit edilmiştir. Kojenerasyon sistemi öncesi elektrik ve doğalgaz tutarlarının toplamından sistemin aylık kazancı çıkarılarak kojenerasyon sistemi sonrasında bu ihtiyaçlar için ödenen tutarlar belirlenir. Kojenerasyon sistemi öncesi toplam elektrik ve doğalgaz tutarı 21026297 TL'dir. Kojenerasyon sistemi sonrası bu değer 19043416 TL'ye düşmektedir. Bu iki değer arasındaki fark bize sistemin getirisini vermektedir. Sistemin getirisinin yıllık 1982881 TL olduğu görülmektedir. Euro bazlı bakıldığında sistemin yıllık getirisi ilk yatırım maliyetin %36'sına ulaşmaktadır.



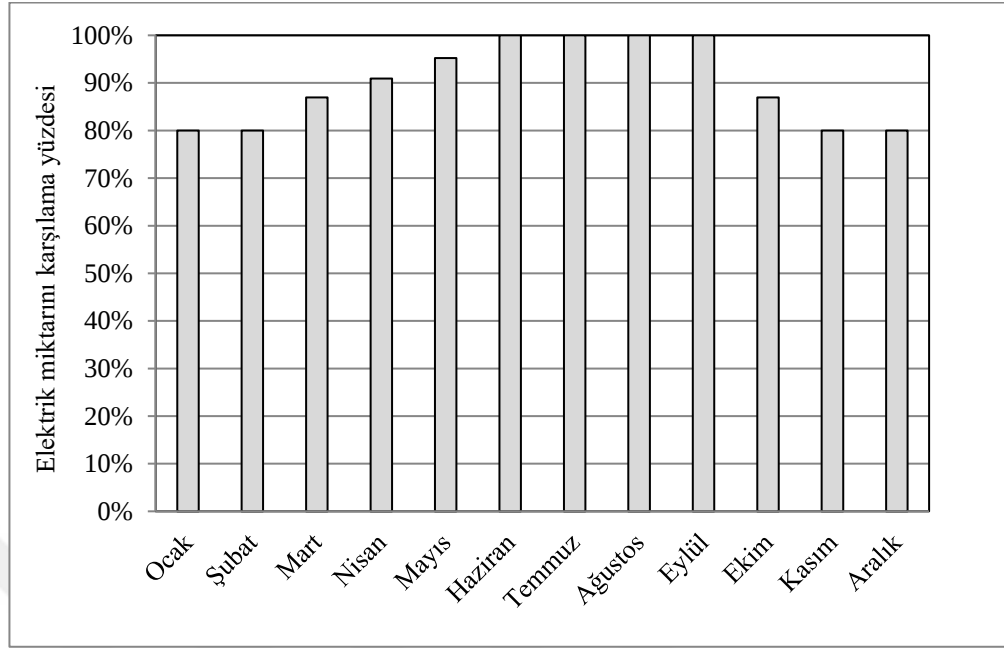
Şekil 4.1. Aylara göre kojenerasyon sistemi öncesi ve sonrası şebekeden alınan saatlik elektrik miktarları

Şekil 4.1’de gösterildiği gibi kojenerasyon sistemi kurulduktan sonra şebekeden alınan aylık saatlik elektrik miktarlarında önemli derecede değişiklik olmuştur. Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında şebekeden elektrik alınmasına ihtiyaç olmadığı görülmektedir. Bu aylarda ihtiyaç duyulan elektrik miktarının tamamı kurulan kojenerasyon sistemi ile karşılanmaktadır. Bu ayların dışında kalan aylarda saatlik elektrik ihtiyacının 2000 kW’lık kısmı kojenerasyon sisteminden karşılanmakta geriye kalan kısmı ise şebekeden karşılanmaktadır. Diğer aylara göre Ocak, Şubat, Kasım ve Aralık aylarında şebekeden alınan saatlik elektrik miktarının fazla olduğu görülmektedir. Bu durum, o aylardaki ısıtma sezonundan kaynaklanmaktadır.



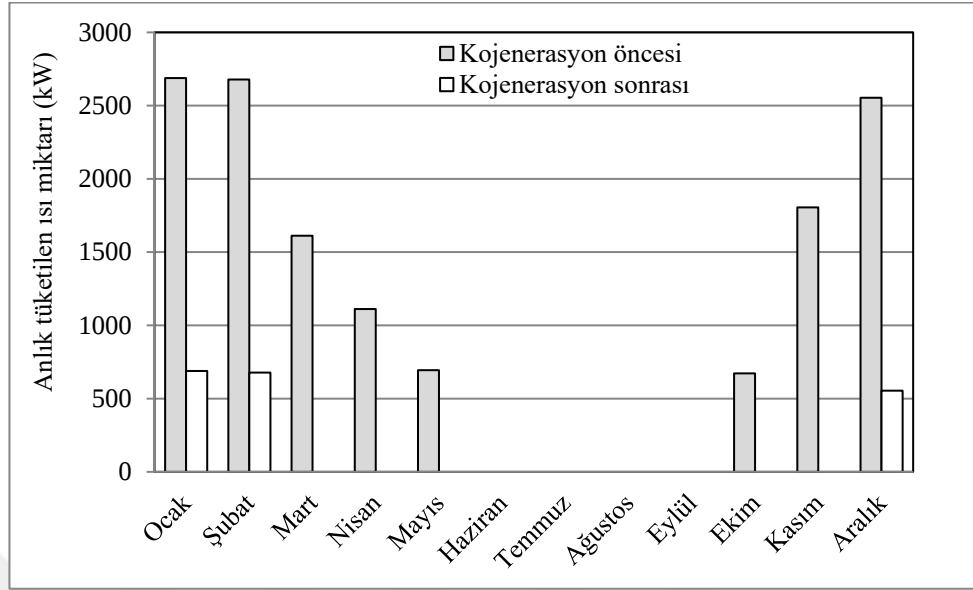
Şekil 4.2. Aylara göre kojenerasyon sistemi öncesi ve sonrası şebekeye ödenen saatlik elektrik ücreti

Tasarlanmış olan kojenerasyon sistemi, şebekeye hiçbir ücret ödenmeyen aylar dışında en az kârı kış aylarında getirmektedir. Kış aylarında sistem kurulmadan önce şebekeye ödenen saatlik elektrik ücreti ortalama 1100 TL iken sistem kurulduktan sonra bu değer 215 TL'ye düşmektedir. Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında şebekeye ücret ödenmesine gerek olmadığı görülmektedir (Şekil4.2). Bu aylardaki saatlik elektrik ihtiyacı tamamen kojenerasyon sisteminden karşılanmaktadır.



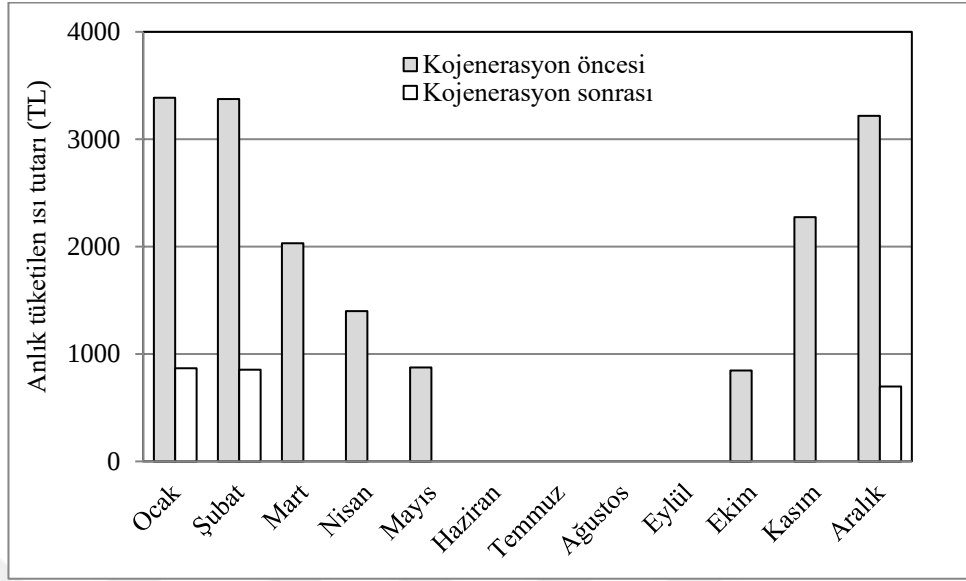
Şekil 4.3. Aylara göre kojenerasyon sisteminin saatlik elektrik miktarlarını karşılama yüzdeleri

Seçilen kojenerasyon sistemi 2000 kW saatlik elektrik üretmektedir. Üretilen elektrik miktarının her ay için ihtiyaç duyulan elektrik miktarlarını karşılama yüzdeleri Şekil 4.3'te verilmiştir. Kış aylarında ihtiyaç duyulan saatlik elektrik ihtiyacı fazla olmasına rağmen sistem bu aylardaki saatlik elektrik ihtiyacının %80'ini karşılamaktadır. Elektrik ihtiyacının %100 ile en fazla karşılandığı aylar Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarıdır. Yüzde oranları ne kadar yükselirse şebekeden alınacak elektrik miktarı o kadar azalır.



Şekil 4.4. Aylara göre kojenerasyon sistemi öncesi ve sonrası anlık tüketilen ısı miktarları

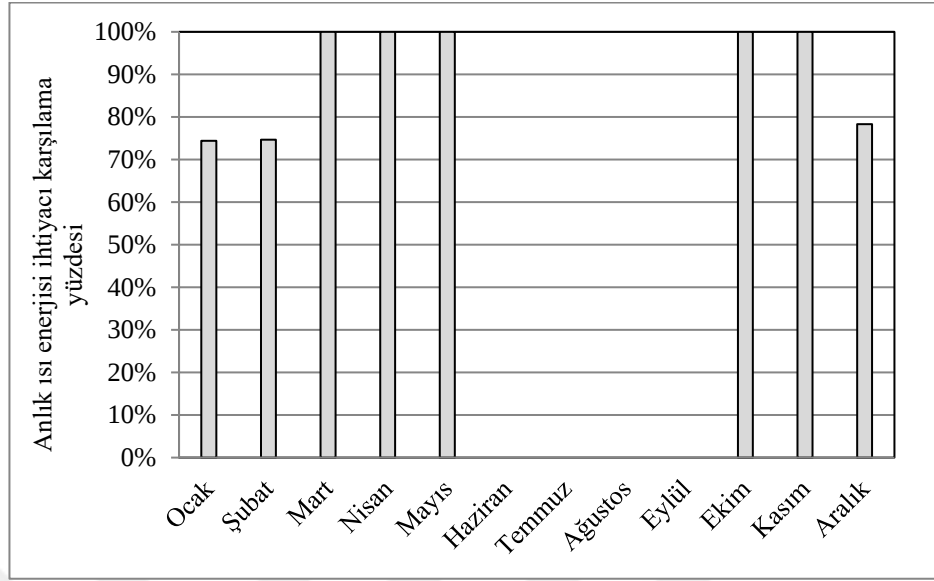
Şekil 4.4’de gösterildiği gibi kojenerasyon sistemi kurulduktan sonra aylara göre anlık tüketilen ısı miktarlarında aşırı derecede değişiklik olmuştur. Tasarlanan kojenerasyon sistemi aylara göre anlık tüketilen ısı miktarının 1977 kW’lık kısmını karşılamaktadır. Örnek birimin ortalama anlık tüketilen ısı miktarı yaklaşık 1150 kW’tır. Seçilen kojenerasyon sistemi anlık tüketilen ısı miktarının hepsini karşılamaktadır. Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında anlık tüketilen ısı miktarının olmadığı görülmektedir. Bu aylarda sistemden elde edilen atık ısı sıcak su ihtiyacı başta olmak üzere istenilen amaçlarla kullanılabilir.



Şekil 4.5. Aylara göre kojenerasyon sistemi öncesi ve sonrası anlık tüketilen ısı tutarları

Örnek birimin ısıtılması için anlık tüketilen ısı tutarları Şekil 4.5'te verilmiştir. Isı enerjisi ihtiyacı için ödenen en yüksek ücretin kış aylarında olduğu görülmektedir. Daha sonrasında Kasım, Mart ve Nisan ayları en çok ısı tüketilen aylardır.

İşletme için kojenerasyon sistemi öncesinde anlık tüketilen ısı tutarı oldukça fazladır. Kojenerasyon sistemi sonrasında bu ücretlerde azalma söz konusudur. Sistemin kurulmasından sonra ısıtma için harcanmayacak gaz maliyeti her ay 101271 TL'dir. Sistem giderleri hariç yıllık yaklaşık 1 milyon TL kazanç sağlanmaktadır. Sistem giderleri çıkarılınca bu değer yaklaşık 790 bin TL'ye düşmektedir. Isı ihtiyacından elde edilen kâr yıllık net kazancın %40'ını oluşturmaktadır.



Şekil 4.6. Aylara göre anlık ısı enerjisi ihtiyacı karşılama yüzdeleri

Çizelge 4.3. İlk yatırım maliyeti ile net karın gelecekteki değerleri ve geri ödeme süresi

YILLAR	İlk Yatırım Maliyeti Yıllara Göre Değeri (Euro))	Net Karın Yıllara Göre Değeri (Euro)	Kümülatif toplam (Euro)
0	1.000.000	0	0
1	1.012.500	360.524	360.524
2	1.025.156	365.031	725.555
3	1.037.971	369.593	1.095.148
4	1.050.945	374.213	1.469.361
5	1.064.082	378.891	1.848.252
6	1.077.383	383.627	2.231.880
7	1.090.850	388.422	2.620.302
8	1.104.486	393.278	3.013.580
9	1.118.292	398.194	3.411.774
10	1.132.271	403.171	3.814.945

Seçilen kojenerasyon sistemi için hesaplanan geri ödeme süresini teyit etmek ve sistemin ömrü boyunca ne kadar kâr getireceğini hesaplamak için, sistemin yatırım maliyeti ve net kâr geleceğe taşınmalıdır. Bu sayede daha doğru sonuçlar elde etmek mümkündür. İlk yatırım maliyeti ile 10. yıl sonundaki kümülatif toplam değerinin kıyaslanması doğru olmaz. 10 yıl önceki ilk yatırım maliyeti ile 10 yıl sonraki ilk

yatırım maliyeti değeri aynı olmamaktadır. Bu nedenle, en doğru kıyaslama ilk yatırım maliyetinin değerini de geleceğe taşıyarak yapılan kıyaslamadır.

Erzurum şartlarındaki örnek birim için seçilen 2 MW gücündeki kojenerasyon sistemi için uygulanan ekonomik yöntemle göre oluşturulmuş tablo Çizelge 4.3’de verilmiştir. Çizelge hazırlanırken Euro için yıllık faiz oranı %1,25 alınmıştır. Bu çizelgeye göre geri ödeme süresi, kümülatif toplamın ilk yatırım maliyetini yakaladığı yıl baz alınarak tespit edilir. Bu çizelgeye göre bu geçiş yılının 3.yıldan sonra olduğu görülmektedir. Diğer bir deyişle, seçilen kojenerasyon sisteminin geri ödeme süresi yaklaşık 3 yıldır. Ayrıca bu tablodan, önceki bölümlerde yapılan hesaplamalar sonucunda bulunan geri ödeme süresinin teyit edildiği anlaşılmaktadır. Seçilen kojenerasyon sistemi 3 yıl sonra işletmeyi kâra geçirmektedir. 10. yılsonunda elde edilen kâr, sistemin o yıldaki genel bakım ücretini fazlasıyla karşılamaktadır.

Erzurum Kombina Tesisi için tasarlanan 526 kW gücündeki trijenerasyon santrali hesaplamaları için kullanılan bazı kabuller Çizelge 4.1’de verilmiştir. Hesaplamalar Ocak ayı baz alınarak yapılmış ve diğer ayların hesaplamaları **EK 2’de** ayrıntılı olarak verilmiştir.

4.3. Trijenerasyon Santralinin Enerji Analizi Sonuçları

Denklem 3.1’e göre;

$$\text{Aylık yakıt tüketimi (m}^3\text{/ay)} = 143 \text{ (m}^3\text{/h)} \times 390 \text{ (h/ay)} = 55720 \text{ m}^3\text{/ay}$$

Denklem 3.2’ye göre;

$$\text{Üretilen net elektrik miktarı (kW/ay)} = 526 \text{ (kW)} \times 390 \text{ (h/ay)} = 205140 \text{ kWh/ay}$$

$$\text{Trijenerasyondaki atık ısı miktarı (kW)} = 659 \text{ kW}$$

Absorpsiyonlu sisteminin soğutma yükü = 273 kW

4.4. Trijenerasyon Santralinin Mali Sonuçları

Denklem 3.4'e göre;

$$\text{Trijenerasyon sistemi elektrik birim maliyeti (TL/kW)} = (143 \text{ (m}^3\text{/h)} / 526 \text{ (kW)}) \times 1,26 \text{ (TL/m}^3\text{)} = 0,36036 \text{ TL/kWh}$$

Denklem 3.5'e göre;

$$\begin{aligned} \text{Elektrik birim maliyeti (bakım sarfıyatı ve yağ dahil) (TL/kWh)} &= 0,36036 \\ &+ (10 \text{ (€/h)} \times 5,5 \text{ (TL/€)} / 526 \text{ (kW)}) + (35 \text{ (kW)} \times 0,36036 \text{ (TL/kWh)} / 526 \\ &\text{(kW)}) = 0,49559 \text{ TL/kWh} \end{aligned}$$

Denklem 3.6'ya göre;

$$\begin{aligned} \text{Erzurum Kombina Tesisinin aylık elektrik maliyeti (TL/ay)} &= 526 \text{ (kW)} \times 390 \\ &\text{(h/ay)} \times 0,4282 \text{ (TL/kWh)} = 83499 \text{ TL/ay} \end{aligned}$$

Denklem 3.7'ye göre;

$$\begin{aligned} \text{Trijenerasyonda üretilen aylık elektrik maliyeti (TL/ay)} &= 526 \text{ (kW)} \times 390 \text{ (h/ay)} \times \\ &0,36036 \text{ (TL/kWh)} = 70270 \text{ TL/ay} \end{aligned}$$

Denklem 3.8'e göre;

$$\begin{aligned} \text{Trijenerasyon tesisinin elektrik getirisi (TL/ay)} &= 83499 \text{ (TL/ay)} - 70270 \text{ (TL/ay)} = \\ &13229 \text{ TL/ay} \end{aligned}$$

Denklem 3.9'a göre;

$$\text{Isıtma için harcanmayacak gaz maliyeti (TL/ay)} = 659 \text{ (kW)} \times 860 / 8250 \text{ (m}^3/\text{kWh)} \times 390 \text{ (h/ay)} \times 1,26 \text{ (TL/m}^3\text{)} = 33757 \text{ TL/ay}$$

Denklem 3.15'e göre;

$$\text{Erzurum Kombina Tesisi aylık soğutma maliyeti (TL/ay)} = 273 \text{ (kW)} \times 0,4282 \text{ (TL/kWh)} \times 390 \text{ (h/ay)} = 38911 \text{ TL/ay}$$

Denklem 3.16'ya göre;

$$\text{Trijenerasyon Sisteminin Soğutma Getirisi (TL/ay)} = 273 \text{ (kW)} \times 0,36036 \text{ (TL/kWh)} \times 390 \text{ (h/ay)} = 32746 \text{ TL/ay}$$

Denklem 3.17'ye göre;

$$\text{Soğutma için harcanmayacak elektrik maliyeti (TL/ay)} = 38911 \text{ (TL/ay)} - 32746 \text{ (TL/ay)} = 6165 \text{ TL/ay}$$

Denklem 3.10'a göre;

$$\text{Servis yedek parça gideri (TL/ay)} = 10 \text{ (€/h)} \times 5,5 \text{ (TL/€)} \times 390 \text{ (h/ay)} = 21450 \text{ TL/ay}$$

Denklem 3.11'e göre;

$$\text{İç tüketim gideri (TL/ay)} = 0,36036 \text{ (TL/kWh)} \times 35 \text{ (kW)} \times 390 \text{ (h/ay)} = 4919 \text{ TL/ay}$$

Denklem 3.18'e göre;

$$\text{Trijenerasyon sistemi aylık kazancı (TL/ay)} = 13229 \text{ (TL/ay)} + 33757 \text{ (TL/ay)} + 6165 \text{ (TL/ay)} - (21450 \text{ (TL/ay)} + 4919 \text{ (TL/ay)}) = 26782 \text{ TL/ay}$$

$$\text{Yatırım maliyeti (€)} = 400000 \text{ €}$$

Denklem 3.13'e göre;

$$\text{Dinamik geri ödeme süresi} = \frac{\ln \frac{106762}{106762 - 400000 \times 0,0125}}{\ln(1 + 0,0125)} = 3,86 \text{ yıl}$$

Euro için yıllık faiz oranı f , merkez bankasının enflasyona göre belirlediği değer dikkate alınarak %1,25 kabul edilmiştir.

Denklem 3.14'e göre;

$$\text{Statik geri ödeme süresi (yıl)} = 400000 \text{ (€)} / 106762 \text{ (€/yıl)} = 3,75 \text{ yıl}$$

Yapılan hesaplamalar sonucunda geri ödeme süresi, yatırım maliyetinin yıllık toplam kazanca bölünmesi ile bulunur. Tüm hesaplamalar **EK 2**'de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

Trijenerasyon sistemi kurulmadan önce Erzurum Kombina Tesisi için elektrik birim maliyeti 0,4282 TL'dir. Sistem kurulduktan sonra trijenerasyon sistemi elektrik birim maliyeti 0,36036 TL'ye düşmektedir. **EK 2**'e göre trijenerasyon sisteminin elektrik getirisi kış aylarında 13229 TL'dir. Kış aylarında ısıtmada kullanılan pompaların devreye girmesi ile saatlik elektrik ihtiyacı da artmaktadır. Bu artış trijenerasyondan üretilen saatlik elektrik miktarına ne kadar yaklaşırsa sistemden elde edilen elektrik getirisi o kadar yüksek olur. Isıtma için harcanmayacak gaz maliyeti 33757 TL ve sistemin soğutma getirisi her ay değişme gösterse de ortalama yaklaşık 34 bin TL civarındadır.

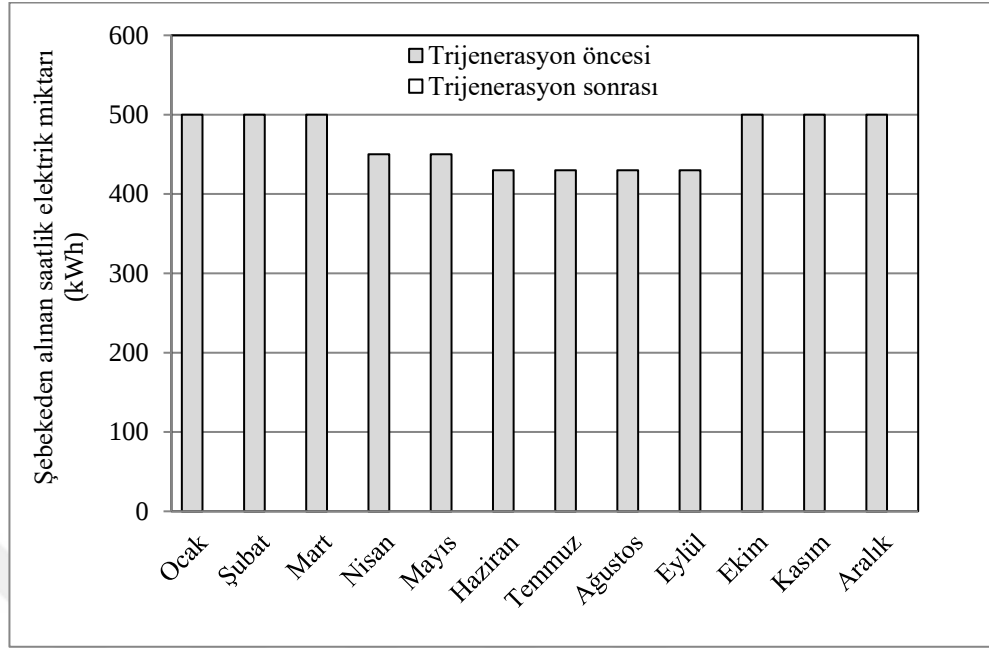
Trijenerasyon sistemlerinde kojenerasyon sisteminden elde edilen ihtiyaçlara ek olarak soğutma ihtiyaçları da elde edilir. Erzurum Kombina Tesisı yılın her ayında soğutmaya ihtiyaç duymaktadır. Soğutma yükleri her bir bina için ayrılan soğutma sistemleri vasıtasıyla karşılanmaktadır. Soğutma yükleri Çizelge 3.5’de verilen elektrik tüketim değerleri içerisinde dir.

Trijenerasyon sisteminde Absorpsiyonlu soğutma ünitesinin kurulması için yılın en az 6 ayı soğutma yapılmalıdır. Absorpsiyonlu soğutma ünitesinin maliyeti 200 000 Euro civarındadır. Ayrıca absorpsiyonlu soğutma ünitesi sıcak su ile çalıştığı için %100 verimde üretilen sıcak su, soğutma sistemi üzerinden geçerken %30’luk bir kayba uğradığı için verim %70’e düşecektir. Üretilen elektriğin %70’lik kısmı ihtiyaç duyulan soğutma yüklerini karşılar ken geriye kalan soğutma ihtiyacını ise dışarıdan karşılayacaktır. Ayrıca soğutma yapılan aylarda ısıtma ihtiyacının olmaması gerekir. Erzurum Kombina Tesisinin her ay soğutma ihtiyacının olması kış aylarında da soğutma ihtiyacının olduğu anlamına gelir. Ancak kış aylarında soğutma yapılan yerler ürünlerin bulunduğu bölümlerdir. Bu bölümler absorpsiyonlu soğutma ünitesi tarafından soğutulamayacağı için sistemin kurulmasında bu ayrıntı dikkate alınmamıştır. Eğer, kış aylarında hem ısıtma hem de soğutma ihtiyacı mevcut ise öncelikli olarak ısıtma ihtiyacı karşılanmalıdır.

Çizelge 4.5. Aylara göre trijenerasyon sistemi öncesi ve sonrası toplam elektrik ve doğalgaz tutarları

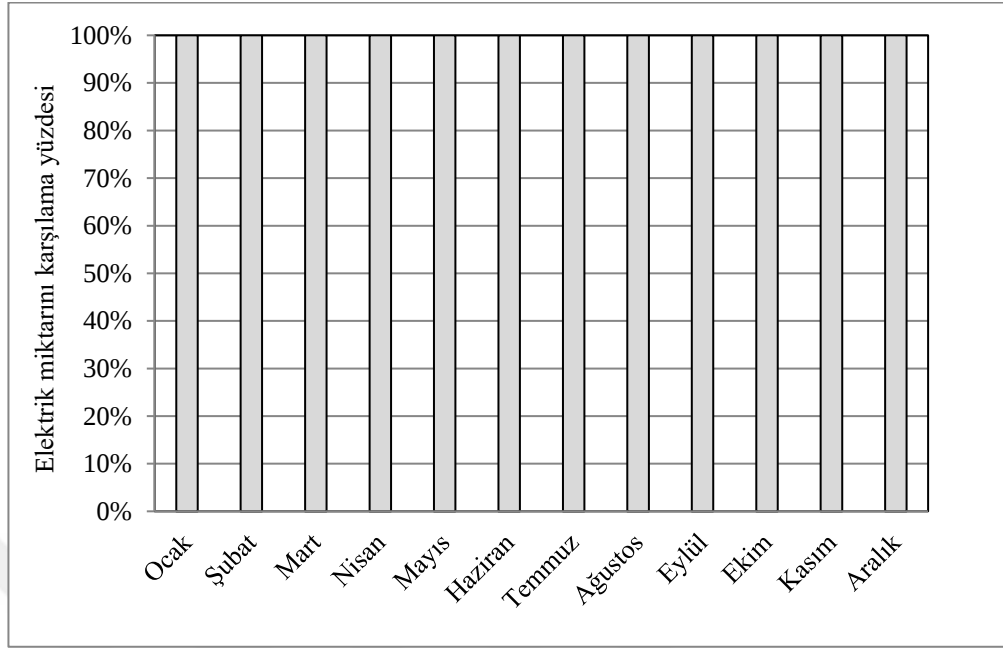
Aylar	Trijenerasyon Sistemi Öncesi			Trijenerasyon Sistemi Sonrası
	Elektrik Tutarı (TL)	Doğalgaz Tutarı (TL)	Elektrik ve Doğalgaz Toplamı (TL)	Elektrik ve Doğalgaz Toplamı (TL)
Ocak	182.160	56.881	239.041	212.259
Şubat	158.500	44.304	202.804	143.098
Mart	97.872	35.358	133.230	73.524
Nisan	119.402	20.248	139.650	92.479
Mayıs	108.320	16.809	125.129	77.958
Haziran	102.100	11.187	113.287	71.402
Temmuz	101.520	9.874	111.394	69.509
Ağustos	99.400	11.301	110.701	68.816
Eylül	62.955	4.420	67.375	25.343
Ekim	151.170	13.090	164.260	104.554
Kasım	250.559	13.956	264.515	204.809
Aralık	198.500	44.777	243.277	183.571
Toplam	1.632.458	282.205	1.914.663	1.327.470
Sistemin Getirisi				587.193

Erzurum Kombina Tesisi için hazırlanan fizibilite raporunda yıllık sistem getirisi 587193 TL'dir. Bu değer, Çizelge 4.5'de teyit edilmiştir. Trijenerasyon sistemi öncesi toplam elektrik ve doğalgaz tutarı 1914663 TL'dir. Trijenerasyon sistemi sonrası bu değer 1327470 TL'ye düşmektedir. Bu iki değer arasındaki fark bize sistemin getirisini vermektedir.



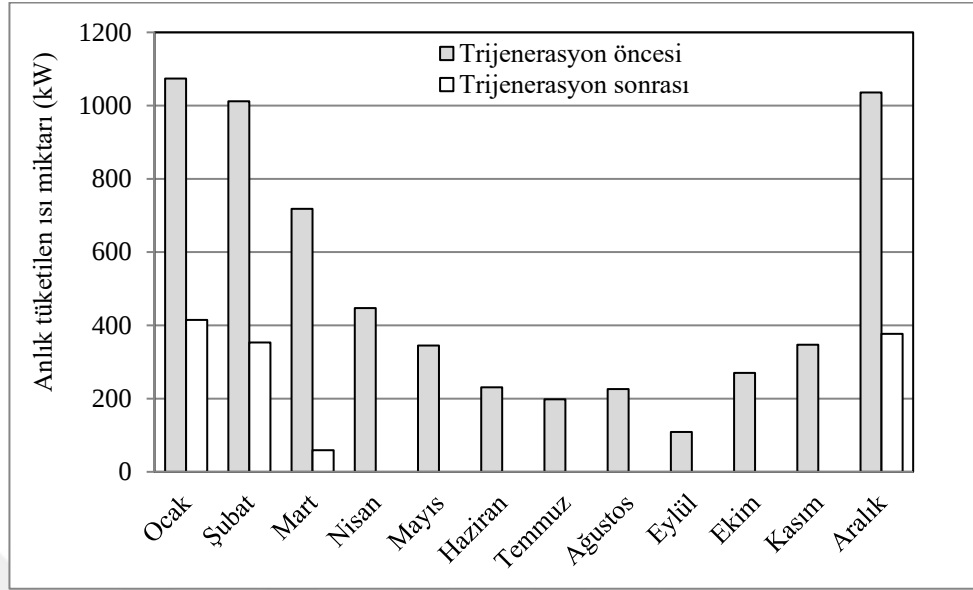
Şekil 4.7. Aylara göre trijenerasyon sistemi öncesi ve sonrası şebekeden alınan saatlik elektrik miktarı

Şekil 4.7’da gösterildiği gibi trijenerasyon sistemi kurulduktan sonra tüm aylardaki elektrik ihtiyaçları karşılanmaktadır. Trijenerasyon sisteminden elde edilen elektriğin ihtiyaç fazlası, tesislerdeki düşünülen sosyal etkinlikler için kullanılabilir. Şebekeden hiçbir şekilde elektrik alınmadığı için şebekeye ücret ödenmesi gerekmemektedir.



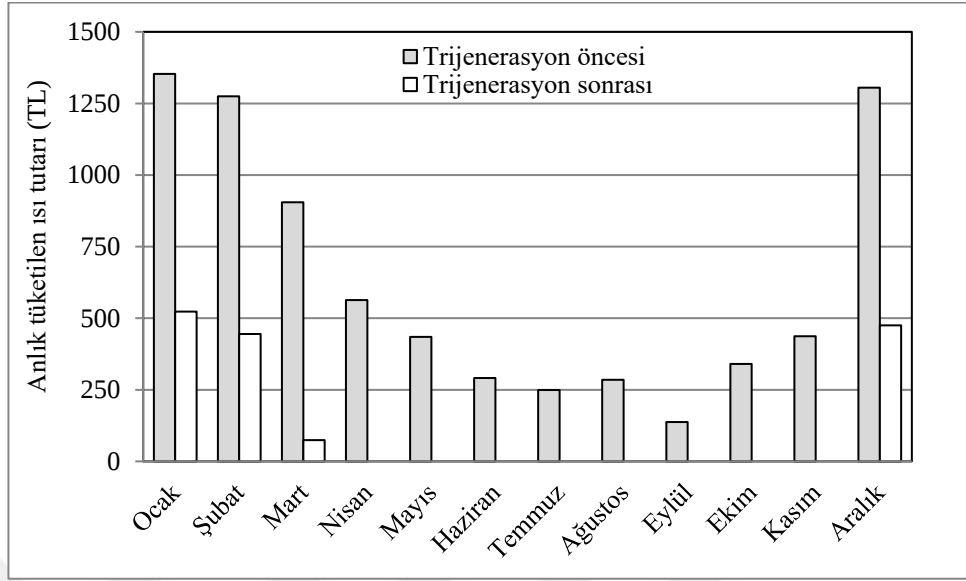
Şekil 4.8. Aylara göre trijenerasyon sisteminin saatlik elektrik miktarlarını karşılama yüzdeleri

Seçilen trijenerasyon sistemi 526 kW saatlik elektrik üretmektedir. Üretilen elektrik miktarının her ay için ihtiyaç duyulan elektrik miktarlarını karşılama yüzdeleri Şekil 4.8'te verilmiştir. Tüm aylarda ihtiyaç duyulan saatlik elektrik ihtiyacı trijenerasyon sisteminden karşılandığı için her ay saatlik elektrik miktarını karşılama yüzdesi %100'dür. Yüzde oranları ne kadar yükselirse şebekeden alınacak elektrik miktarı o kadar azalır.



Şekil 4.9. Aylara göre trijenerasyon sistemi öncesi ve sonrası anlık tüketilen ısı miktarları

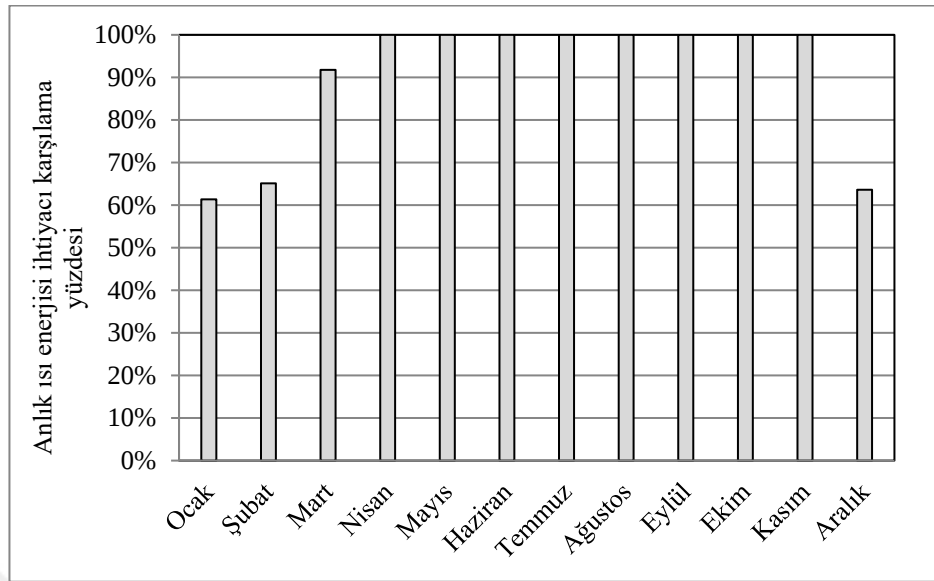
Şekil 4.9’de gösterildiği gibi trijenerasyon sistemi kurulduktan sonra anlık tüketilen ısı miktarlarında önemli derecede değişiklik olmuştur. Erzurum Kombina Tesisinin ısı enerjisi ihtiyaçlarının çoğu motorun atık ısısından karşılanmaktadır. Tasarlanan trijenerasyon sistemi aylara göre anlık tüketilen ısı miktarının 659 kW’lık kısmını karşılamaktadır. Erzurum Kombina Tesisinin ortalama anlık tüketilen ısı miktarı yaklaşık 500 kW’tır. Trijenerasyon sistemi sadece kış aylarında anlık tüketilen ısı miktarının bir kısmını karşılarken, Nisan, Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül, Ekim ve Kasım aylarında anlık tüketilen ısı miktarlarının tamamını karşılamaktadır.



Şekil 4.10. Aylara göre trijenerasyon sistemi öncesi ve sonrası anlık tüketilen ısı tutarları

Erzurum Kombina Tesisinin anlık tüketilen ısı tutarları Şekil 4.10'da verilmiştir. Trijenerasyon sistemi sonrasında anlık tüketilen ısı tutarı en yüksek Ocak ayındadır. Daha sonrasında Aralık ve Şubat ayları gelmektedir. Ocak ayında trijenerasyon sistemi öncesi anlık tüketilen ısı miktarı için ödenen ücret 1353 TL iken trijenerasyon sistemi sonrasında bu değer 523 TL'ye düşmüştür. En yüksek anlık ısı tüketiminin olduğu Ocak ayında 830 TL kâr elde edilmiştir.

Erzurum Kombina Tesisi için trijenerasyon sistemi öncesinde anlık tüketilen ısı tutarı toplamda 7576 TL iken trijenerasyon sistemi sonrasında bu değer 1517 TL'ye düşmektedir. Anlık tüketilen ısı tutarından toplamda 6059 TL kâr elde edilmektedir. Sistemin kurulmasından sonra ısıtma için harcanmayacak gaz maliyeti her ay 33757 TL'dir. Isıtma ihtiyacından sistem giderleri hariç yıllık yaklaşık 405084 TL kazanç sağlanmaktadır. Sistem giderleri dahil edildiğinde ısıtma ihtiyacından net olarak 378715 TL kâr elde edilmektedir.



Şekil 4.11. Aylara göre trijenerasyon sisteminin anlık enerji ihtiyacını karşılama yüzdeleri

Şekil 4.11’da aylara göre trijenerasyon sisteminin anlık ısı enerji ihtiyacını karşılama yüzdeleri verilmiştir. Tasarlanan trijenerasyon sistemi ile kış aylarında tesisin saatlik ısı ihtiyacının yaklaşık %65’i karşılanmaktadır. Bu aylarda diğer aylara göre ısıtma ihtiyacı oldukça fazladır. Yaz aylarında ise saatlik ısıtma ihtiyacının tamamı tasarlanan trijenerasyon sistemi ile karşılanmaktadır.

Çizelge 4.6. İlk yatırım maliyeti ile net karın gelecekteki değerleri ve geri ödeme süresi

YILLAR	İlk Yatırım Maliyeti Yıllara Göre Değeri (Euro)	Net Karın Yıllara Göre Değeri (Euro)	Kümülatif toplam (Euro)
0	400.000	0	0
1	405.000	106.762	106.762
2	410.063	108.097	214.859
3	415.188	109.448	324.306
4	420.378	110.816	435.122
5	425.633	112.201	547.323
6	430.953	113.604	660.927
7	436.340	115.024	775.950
8	441.794	116.461	892.412
9	447.317	117.917	1.010.329
10	452.908	119.391	1.129.720

Erzurum Kombina Tesisi için seçilen 526 kW gücündeki trijenerasyon sistemi için uygulanan ekonomik yöntemle göre oluşturulmuş tablo Çizelge 4.6'da verilmiştir. Çizelge hazırlanırken Euro biriminin faiz oranı %1,25 alınmıştır. Bu çizelgeye göre geri ödeme süresi, kümülatif toplamın ilk yatırım maliyetini yakaladığı yıl baz alınarak tespit edilir. Bu çizelgeye göre bu geçiş yılının 4.yılda olduğu görülmektedir. Diğer bir deyişle, seçilen trijenerasyon sisteminin geri ödeme süresi yaklaşık 4 yıldır. Ayrıca bu tablodan, önceki bölümlerde yapılan hesaplamalar sonucunda bulunan geri ödeme süresinin teyit edildiği anlaşılmaktadır. Seçilen trijenerasyon sistemi 4. yıldan itibaren tesisi kâra geçirmektedir. 10. yıldaki kümülatif toplam ile aynı yıldaki yatırım maliyeti kıyaslandığında yatırım maliyetinin 452908 Euro ve kümülatif toplamın 1129720 Euro olduğu görülmektedir. Aradaki fark alınacak olursa 676812 Euro kâr söz konusudur. Bu da sistemin mantıklı bir yatırım olacağı anlamı taşımaktadır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

İnsanların gereksinim duyduğu enerji ihtiyaçları gün geçtikçe artmaktadır. Bu enerji ihtiyaçlarını karşılamak, kaynakların yetersiz kalmasından ve maddi açıdan enerji maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı güç hale gelmektedir. Bunun için daha verimli sistemlerin kullanılması gerekmektedir.

Birleşik ısı-güç (kojenerasyon ve trijenerasyon) sistemleri son 20 yıldır dünyada geniş bir yer bulan ve enerji verimliliği oldukça yüksek olan sistemlerdir. Bu sistemlerinin verimli olması çevreye atılan zararlı emisyonların azalmasına neden olur. Böylece, çevreye önem veren kuruluşlar tarafından tüm dünyada tercih edilmektedirler. Ayrıca, bu sistemlerde tesislerin elektrik ihtiyaçları sistem tarafından karşılandığı için, şebekede olabilecek arıza ve enerji kesintilerinden ilgili birimler etkilenmeyecektir.

Bu çalışmada kojenerasyon ve trijenerasyon sistemleri araştırılarak Erzurum şartlarında örnek bir birim için gaz motorlu kojenerasyon sistemi ile Erzurum Kombina Tesisini için doğalgaz motorlu trijenerasyon sisteminin fizibilite raporu hazırlanmış ve sistemlerin ekonomik analizleri yapılmıştır.

Sistem hesaplamaları yapılırken hem örnek birimin hem de Erzurum Kombina Tesisinin yıllık elektrik, ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçları belirlenmiştir. Bu verilerden yola çıkarak anlık enerji gereksinimi tespit edilmiştir. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda Erzurum şartlarındaki örnek birim için kojenerasyon, Erzurum Kombina Tesisini için ise trijenerasyon sisteminin uygun olduğu görülmüştür. Kurulacak sistem seçimi yapılırken elektrik ihtiyaçlarının mümkün olduğunca tamamının karşılanabileceği ay baz alınmıştır. Kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin yetersiz olduğu saatlerde gerekli elektrik ihtiyacı şebekeden sağlanacaktır.

Erzurum şartlarındaki örnek birim için kojenerasyon sistemi kurulduktan sonra aylık elektrik kazancı ortalama 99489 TL olurken harcanmayacak gaz kazancı yaklaşık

102000 TL civarında olmaktadır. Bu değerler dikkate alındığında sistem giderleri dahil yıllık toplam net kazanç 1982881 TL olmaktadır. Sitemin ilk yatırım maliyeti 1 000 000 Euro'dur. Yıllık toplam kazancın ilk yatırım maliyetine bölünmesi ile statik geri ödeme süresi 2,77 yıl olarak bulunmuştur. Yıllık faiz oranı dikkate alınarak hesaplanan dinamik geri ödeme süresinde bu değer 2,84 yıl olarak bulunmuştur. Tasarlanan kojenerasyon sistemi için hazırlanan Çizelge 4.3'te birikmeli (kümülatif) toplamın 10. yıl sonundaki değeri ile aynı yıldaki yatırım maliyeti kıyaslandığında sistemin zarar etmediği görülmektedir. Sistem 10 yıl sonunda 14754707 TL kâr etmektedir.

Günümüzde şebekeden çekilen elektrik birim maliyeti 0,4282 TL'dir. Erzurum şartlarında örnek birim için tasarlanan kojenerasyon sisteminden elde edilen elektriğin birim fiyatı 0,30065 TL'ye, Erzurum Kombina Tesisleri için trijenerasyon sistemi kurulduktan sonra sistemden çekilen elektriğin birim fiyatı ise 0,36036 TL'ye düşmektedir.

Trijenerasyon sistemi kurulduktan sonra aylık elektrik kazancı ortalama 13229 TL olurken harcanmayacak gaz kazancı 33757 TL civarında olmaktadır. Soğutma ihtiyacından sağlanacak kazanç ise ortalama 34 bin TL'dir. Bu değerler dikkate alındığında yıllık toplam kazanç 587193 TL olmaktadır. Sitemin ilk yatırım maliyeti yaklaşık 400000 Euro'dur. Yıllık toplam kazancın ilk yatırım maliyetine bölünmesi ile statik geri ödeme süresi 3,75 yıl olarak bulunmuştur. Yıllık faiz oranı dikkate alınarak hesaplanan dinamik geri ödeme süresinde ise bu değer 3,86 yıl olarak bulunmuştur. Trijenerasyon sistemi ilk yatırım maliyeti ile kıyaslandığında 10. yılsonunda yaklaşık 3722466 TL kâr elde edilmiştir.

Erzurum'da yeni inşa edilen MNG Mall alışveriş merkezi trijenerasyon sistemi kullanılmaktadır. Alışveriş merkezinde 3 adet 2,5 MW gücünde gaz motorları kullanılmaktadır. Kurulan tesisin yatırım maliyeti 4 milyon Euro olup geri ödeme süresi 9 yıldır. Geri ödeme süresinin bu denli uzun olması sistemin kurulumunda ısıtma ihtiyaçlarının baz alınmasından kaynaklanmaktadır. Bu açıdan bakıldığında Erzurum

Kombina Tesisi için yapılan trijenerasyon çalışmasının mantıklı sınırlar içinde olduğu görülmektedir.

Bu çalışma sonucunda aşağıdaki öneriler yapılabilir:

- Isı ihtiyacı fazla olan yerlerde gaz türbini kullanılmalıdır. Çünkü gaz türbininden elde edilen ısı, gaz motorundan elde edilen ısıya göre daha fazladır. Ancak çoğu işletme gaz motoru tercihinde bulunmaktadır. Bunun nedeni; gaz motorlarının devreye alma süresinin gaz türbinlerine göre daha kısa olmasıdır.
- Herhangi bir işletme için birleşik ısı-güç santralleri düşünülürken elektrik, ısıtma ve soğutma ihtiyaçları çok ayrıntılı bir şekilde belirlenmelidir. Bu ihtiyaçları belirlerken sayaçtan saatlik elektrik ölçüm değerleri alınmalıdır. Bu şekilde yapılacak hesaplamalar daha hassas olabilecektir.
- Gaz motorunun çalışma yük oranı %65'in altına düşürülmemelidir. Aksi takdirde sistemin elektrik getirisinde zarar söz konusu olmaktadır.
- Erzurum gibi soğuk iklim bölgelerinde bulunan ve ısı ihtiyaçları fazla olan birimlerde sistem seçimi yapılırken ısı ihtiyaçları baz alınmamalıdır. Isı ihtiyaçları dikkate alınarak tasarlanan kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin geri ödeme süreleri oldukça uzundur.
- Kapasitesi düşük olan tesislerde de kojenerasyon ve trijenerasyon uygulaması yapılmamalıdır. Her ne kadar elektrik, ısıtma ve soğutma yükleri tek bir enerji kaynağından sağlansa da, sistemlerin ilk yatırım maliyetleri yüksek olduğundan geri ödeme süreleri uzayabilmektedir.

KAYNAKLAR

- Aikins, J.E.A., 1995. An Investigation on the Factors That Determine the Atractivenes of Cogeneration bNeat Recovery System & CHp, 15 (5) 473-480
- Akdeniz, N., 2007. Doğal Gazlı Kojenerasyon Sisteminin Ekserjetik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Anonim, 2018a. www.tesisat.org, (20.03.2018)
- Anonim, 2018b. www.arasedas.com, (25.03.2018)
- Anonim, 2018c. www.bmgs.com.tr/guc-sistemleri.com (22.03.2018)
- Anonim, 2018d. www.palen.com.tr, (28.03.2018)
- Arat, B., 2006. Organize Sanayii Bölgelerinde Kojenerasyon Santralinin Yer Optimizasyonu. Y. Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bakırcı, K., Özyurt, Ö., Yılmaz, M., Erdoğan, S., 2006. Erzurum İli Enerji Çalışmaları İçin İklim ve Meteoroloji Verileri, Tesisat Mühendisliği Dergisi, 95, 19-26.
- Ballı, Ö., 2008. Kojenerasyon Sistemlerinin Enerji, Kullanabilirlik (Ekserji) ve Ekserjiekonomik Analiz Yöntemleri Kullanılarak Performansının Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Bidini, G., Grimaldi, C.N. Mariani, F., 1999. Experimantal Analysis of the Actual Beheviour of a Natural Gas Fueled Engine Caterpillar (CAT) 3516. İtaly.
- Çaka, D., 2006. Isıl Sistem Bileşenlerinin Yatırım Maliyetleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çalışıcı, M.Ü., 2005. Kojenerasyon Sistemleri ve Bir İşletmenin İhtiyacını Karşılacak Kojenerasyon Sisteminin Teknik ve Ekonomik Uygulanabilirliği. Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya.
- Derbentli, T. (1996). Birleşik Isı Güç Sistemleri. Enerji: Isıtma, Soğutma, Havalandırma, Yalıtım ve Doğalgaz Dergisi, 6, 60-69, 1998.
- Ehyaiei, M., Bahadori, M., 2007, Selection of Micro Turbines to Meet Electrical and Thermal Energy Needs of Buildings in Iran, Energy and Buildings.
- Ekinci, D.A., 2013. Erzurum Kampüs Hastanesine Uygulanacak Trijenerasyon Sisteminin Fizibilitesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Frangopoulos, C.A., Lygeros, A.I., Markou, C.T. and Kaloritis, P. 1996. Thermoeconomic Operation Optimization of the Hllenic Aspropyrgos RefineryCombined-Cuycle Cogeneration System. Applied Thermal Engineering 16, 949-958.
- Gencay, E., 1999. "Kojenerasyon Santrallerinde Gaz Türbinleri" 5. Uluslararası Kojenerasyon ve Çevre Konferansı ve Sergisi, İstanbul , 55-59.
- Guarinello, F., Gerqueira, S., Nebra, S.A., 2000 ,Thermoeconomic Evaluation Of A Gas Turbine Cogeneration System, Energy Conversion and Management, 41:1191-1200.
- Huang, Y., Wang, Y. D., Chen, H., Zhang, X., Mondol, J., Shah, N., Hewitt, N. J., 2017. Performance analysis of biofuel fired trigeneration systems with energy storage for remote households. Applied Energy, 186, 530-538.

- Ilık, A., 2012. Trijenerasyon Sistemlerinin Enerji ve Ekserji Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- İmal, M; Kısakesen, T; Kaya, A; 2016. Enerji Ekonomisi Açısından Kojenerasyon ve Trijenerasyon Teknolojilerinin Isıtma-Soğutma Kapasitelerinin Analizi. Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences, 19(2), 9-19.
- İnalı, M., Yücel, H.L., Işık, E., 2002. Kojenerasyon Sistemlerinin Teknik ve Ekonomik Uygulanabilirliği, Mühendis ve Makine, 506 (2002), 13–25.
- Kakilli, A., 2003. Doğalgaz Kombine Çevrim Santrallerinin, Diğer Elektrik Üretim Merkezleriyle Çevre Kriterlerine Göre Karşılaştırılması. 3e Electrotech, İstanbul. 120-126.
- Kıncay, O., Yumurtacı, Z., 2006. Bir Üniversite Kampüsü İçin Uygun Enerji Sisteminin Seçimi. Tesisat Mühendisliği sayı 95.
- Koçak, T., Gülşen, O., 2010. Kojenerasyon nedir? Kojenerasyon Teknikleri ve Sistem Seçimi. Bölgesel Isıtma ve Kojenerasyon Konferansı Bildirileri Makina Mühendisleri Odası.
- Luz-Silveira, J., Beyene, A., Leal, E.M., Santana, J.A., Okada, D., 2002, Thermo-economic analysis of a cogeneration system of a university campus, Applied Thermal Engineering, 22:1471-1483.
- Mert, M.S., 2010. Bir Güç Santralinin Ekserjik ve Ekonomik Analizi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Orhan, İ., 2003. Kojenerasyon Tesislerinde Kullanılan Güç Teknolojileri. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Özdemir, N., 2011. Çekmeköy İlçesi Toplu Konut Bölgeleri İçin Kojenerasyon Sistemlerinin Analizi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Öztürk, H.H., Kaya, D., 2014. Absorpsiyonlu Soğutma. Kojenerasyon ve Trijenerasyon Tekniği, Bulut, M. Umuttepe Yayınları, Kocaeli, 140-141
- Öztürk, H.H., Kaya, D., 2014. Gaz Türbinlerinin Bileşenleri. Kojenerasyon ve Trijenerasyon Tekniği, Bulut, M. Umuttepe Yayınları, Kocaeli, 42-43.
- Öztürk, H.H., Kaya, D., 2014. Kojenerasyon Tesisinin Çalışma İlkesi. Kojenerasyon ve Trijenerasyon Tekniği, Bulut, M. Umuttepe Yayınları, Kocaeli, 13-14.
- Riad, B., Michel, F., 1998. Energy Convers.Mgmt, No:16-18 Vol. 39 pp. 1791–1802. France.
- Sakawa, M., Kato, K., Ushiro, S., Noaka, M., 2001 ‘‘Operation Planning of District Heating and Cooling Plants Using Genetic Algorithms for Mixed Integer Programming’’, Applied Soft Computing, 1:139-150.
- Sevinchan, E., Dincer, I., 2018. Comparative Assessment of Three Integrated Trigeneration Systems for Dairy Farms. In Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions, 233-252.
- Smith, M.A.F., P.C. Twidell, J.W., 1995. Technical and Operational Performance of a Small Scale CHP Plant. Energy, 20 (12), 1205–1214.
- Şencan, A., 2004. Atık Isı ile Çalışan Absorpsiyonlu Sistemlerin Modellemesi, Ekserji Analizi ve Optimizasyonu. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Üçgül, İ., Elibüyük, U., 2015. Üniversite yerleşkeleri için doğalgazlı trijenerasyon sisteminin değerlendirilmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 3(2),

105-109.

Yörü, Y., 2008. Kojenerasyon Sistemlerinde Yapay Sinir Ağları Uygulaması ve Ekserji Analizi , Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.



ÖZGEÇMİŞ

Araştırmacı; 1992 yılında Ardahan ilinde dünyaya geldi. İlk, orta ve lise öğrenimini İnegöl’de tamamladı. 2011 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden 2016 yılında mezun oldu. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde Enerji bilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı.

