

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TRİJENERASYON SİSTEMLERİNİN
ENERJİ, EKONOMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ**

AHMET SERHAN HERGÜL

KOCAELİ 2016

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


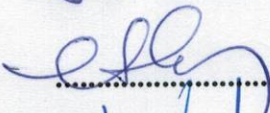
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TRİJENERASYON SİSTEMLERİNİN
ENERJİ, EKONOMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ

AHMET SERHAN HERGÜL

Prof.Dr. Durmuş KAYA
Danışman, Kocaeli Üniv.
Doç.Dr. Ethem TOKLU
Jüri Üyesi, Düzce Üniv.
Yrd.Doç.Dr. Volkan ÇOBAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 09.06.2016

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Enerji üretiminde sürdürülebilirliğin sağlanması, dışa bağımlılığın ve çevresel etkilerin azaltılması, kaynak çeşitliliğinin ve enerji arz güvenliğinin sağlanması ülkemizin en temel ihtiyaçlarındandır. Enerji ihtiyacımızı karşıladığımız konvansiyonel enerji kaynaklarının hızla azalması alternatif enerji kaynaklarının talepleri karşılama henüz yetersiz kalması ve artan çevresel etkiler göz önünde bulundurulduğunda enerji verimliliğinin önemi her geçen gün artmaktadır.

Artan enerji talepleri ile tedarik zincirlerinin güvenilirlik sorunları enerji kaynaklarını daha verimli kullanmayı gerektirmektedir. Bunun yanında, çevresel sorunlar göz önüne alındığında enerji verimli teknolojiler emisyonların azaltılmasında önemli bir fırsat sunmaktadır.

Endüstriyel işletmelerde elektrik tüketiminin yanında, proseslerde ısıtma, soğutma, nemlendirme ve buhar ihtiyaçları da bulunmaktadır. İşletmelerin gider kalemleri incelendiğinde ürün maliyetlerinin yükselmesi açısından enerji tüketimlerinin önemli bir yer tuttuğu görülmektedir. Bu nedenle birlikte üretim sistemlerine olan ilgi ve ihtiyaç, sektörler tarafından da artmış bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasıyla amaç elektrik, ısı ve soğutmanın birlikte üretildiği sistemlerin kurulumu açısından sistem seçimine karar vermede bilgi ve uygulama eksikliğini gidererek, akademik bilgi ile endüstriyel bilgiyi bir araya getirmektedir.

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde büyük emeği olan danışmanım Sayın Prof. Dr. Durmuş KAYA'ya ve değerli yardımları için Yard. Doç. Dr. Volkan ÇOBAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman olduğu gibi, bu tez çalışması sırasında da destekleriyle yanımda olan aileme ve çok değerli eşim U.Merve KARA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs - 2016

Ahmet Serhan HERGÜL

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	3
1.1. Kojenerasyon Sistemlerinin Tanımı.....	3
1.1.1. Kojenerasyon sistemlerinin tarihsel gelişimi	4
1.1.2. Elektrik üretim sistemine göre kojenerasyon sistemleri	9
1.1.3. Kojenerasyon sistemlerindeki güç kaynaklarının özellikleri	12
1.2. Trijenerasyon Sistemleri	14
1.2.1. Trijenerasyon sistemlerinin tanımı.....	14
1.2.2. Trijenerasyon sistemlerinin çalışma prensibi.....	16
1.2.2.1. Gaz türbinli trijenerasyon sistemi çalışma prensibi	17
1.2.2.2. Buhar türbinli trijenerasyon sistemi çalışma prensibi.....	18
1.2.2.3. Gaz motorlu trijenerasyon sistemi çalışma prensibi	20
1.3. Gaz Motorlu Trijenerasyon Sistemlerinin Bileşenleri.....	21
1.3.1. Gaz motorunun çalışma prensibi ve temel yapı elemanları	22
1.3.2. Atık ısı kazanının çalışma prensibi	27
1.3.3. Absorbsiyonlu soğutma sisteminin çalışma prensibi	29
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	31
3. MEVCUT DURUM ANALİZİ VE KURAMSAL BİLGİLER.....	36
3.1. Elektrik Tüketim Profili	37
3.2. Isı Tüketim Profili	41
3.3. Soğutma Tüketim Profili.....	44
4. TRİJENERASYON SİSTEMİNİN SEÇİMİ VE BOYUTLANDIRMASI.....	47
4.1. Güç Ünitesi Seçimi ve Sistem Tasarımı	47
4.2. Trijenerasyon Sistemi Enerji Üretimi ve Referans Yıla Dair Analizler	56
4.3. Çevresel Etkiler ve Ekonomik Analiz.....	63
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR	73
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	78
ÖZGEÇMİŞ	79

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Üretim metoduna göre toplam sistem verimi.....	5
Şekil 1.2.	Ayrık üretim ve kojenerasyon uygulaması sankey diyagramı.....	6
Şekil 1.3.	Ülkemizde kojenerasyon tesisleri kullanım alanları.....	9
Şekil 1.4.	Gaz türbinli kojenerasyon sistemi şeması.....	10
Şekil 1.5.	Buhar türbinli kojenerasyon şeması.....	11
Şekil 1.6.	Gaz/Dizel motorlu kojenerasyon sistemi şeması.....	12
Şekil 1.7.	Trijenerasyon santralinin sankey diyagramı prensip gösterimi.....	15
Şekil 1.8.	Trijenerasyon sistemi genel akış şeması.....	17
Şekil 1.9.	Gaz türbinli trijenerasyon sistemi temel akış şeması.....	18
Şekil 1.10.	Buhar türbinli trijenerasyon sistemi temel akış şeması.....	20
Şekil 1.11.	Gaz motorlu trijenerasyon sistemi temel akış şeması.....	21
Şekil 1.12.	Trijenerasyon sisteminde iş akışı.....	22
Şekil 1.13.	Dünyada trijenerasyon için tercih edilen güç ünitesi dağılımı.....	23
Şekil 1.14.	Atık ısı kazanı.....	28
Şekil 1.15.	Absorbsiyonlu soğutma sistemi çalışma prensibi.....	29
Şekil 3.1.	2014 yılı aylık ortalama güç talebi.....	38
Şekil 3.2.	2014 yılı aylık elektrik enerjisi tüketimi.....	38
Şekil 3.3.	2015 yılı aylık ortalama güç talebi.....	40
Şekil 3.4.	2015 yılı aylık elektrik tüketimi.....	41
Şekil 3.5.	2014 yılı aylık ortalama buhar tüketimi profili.....	43
Şekil 3.6.	2015 yılı aylık ortalama buhar tüketimi.....	43
Şekil 3.7.	2014 yılı soğutma enerjisi, çiller tüketimi ve COP değeri.....	45
Şekil 3.8.	2015 yılı soğutma enerjisi, çiller tüketimi ve COP değeri.....	46
Şekil 4.1.	Üçtü tüketim saatine göre gaz motoru seçim grafiği.....	53
Şekil 4.2.	Trijenerasyon sistemi ile elektrik üretimi.....	58
Şekil 4.3.	Trijenerasyon toplam enerji üretimi.....	58
Şekil 4.4.	Atık ısı kazanı buhar üretimi ve tüketim grafiği.....	59
Şekil 4.5.	Atık ısı kazanı buhar üretimi saatlik ortalama grafiği.....	59
Şekil 4.6.	Absorbsiyonlu çiller soğutma enerjisi üretimi.....	60
Şekil 4.7.	Buhar sıkıştırılmalı çiller yükü, talep eğrisi ve motor yükü.....	61
Şekil 4.8.	Yeni talep eğrisi ve gaz motoru yükü.....	62

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Kojenerasyon sistemi uygulanan sektörlerde enerji tasarrufu	8
Tablo 1.2. Kojenerasyon sistemleri için güç kaynaklarının özellikleri.....	14
Tablo 3.1. 2014 yılı aylık elektrik tüketimleri	37
Tablo 3.2. 2015 yılı aylık ortalama güç talepleri	39
Tablo 3.3. 2014 yılı aylık ısı tüketim değerleri	42
Tablo 3.4. 2014 yılı aylık soğutma enerjisi tüketimleri	44
Tablo 4.1. Yük alma ve yük atma yeteneği değerleri	49
Tablo 4.2. Gaz motorlarına ait teknik katalog verileri	55
Tablo 4.3. Gaz motorları yük durumuna bağlı yakıt tüketimleri	56
Tablo 4.4. Emisyon kazancı tablosu	65
Tablo 4.5. Doğalgaz eşdeğeri emisyon ve enerji miktarı.....	65
Tablo 4.6. Mali analiz için birim fiyat tablosu.....	66
Tablo 4.7. Trijenerasyon sistemi gelir gider akış tablosu	67
Tablo 4.8. Trijenerasyon sistemi gelir gider akış tablosu	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

CO_2	: Karbondioksit
E_{cw}	: Soğutulan su enerjisi
E_e	: Elektrik enerjisi
E_g	: Motora giren yakıt enerjisi
E_y	: Yakıt enerjisi
F_{CCHP}	: Trijenerasyonla tüketilen toplam birincil enerji
F_s	: Ayrık üretimle tüketilen birincil enerji
F_z	: Yakıtın termal içeriği
H	: Tüketime sunulan ısı
$LiBr$: Lityum Bromür
NH_3	: Amonyak
n_{e-sp}	: Referans elektrik üretimi verimi
n_k	: Kazan verimi
n_{pp}	: Güç santrali verimi
n_{t-sp}	: Referans ısı üretimi verimi
Q_L	: Üretilen soğutma
Q_z	: Trijenerasyonla üretilen ısı
R_z	: Trijenerasyonla üretilen soğutma
T_{doy}	: Doyma sıcaklığı
W_g	: Birim iş tüketimi

Kısaltmalar

CCHP	: Combined Cooling Heat and Power (Birlikte Isı, Soğutma ve Güç Üretimi)
CHP	: Combined Heat and Power (Birlikte Isı ve Güç Üretimi)
COP	: Coefficient of Performance (Performans Katsayısı)
DUPS	: Dynamic Uninterruptible Power Supply (Dinamik Güç Kaynağı)
EIO	: Elektrik Isı Oranı
EUf	: Energy Utilization Factor (Enerji Kullanım Faktörü)
FESR	: Fuel Energy Saving Ratio (Yakıt Enerjisi Tasarruf Oranı)
HT	: High Temperature (Yüksek Sıcaklık)
LT	: Low Temperature (Düşük Sıcaklık)
OG	: Orta Gerilim
TPES	: Trigeneration Primary Energy Saving (Trijenerasyon Birincil Enerji Tasarrufu)

TRİJENERASYON SİSTEMLERİNİN ENERJİ, EKONOMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ

ÖZET

Enerji üretim sistemleri incelendiğinde fosil yakıtlar ile çalışan geleneksel güç santralleri yakıt enerjisinin yalnızca üçte birini faydalı işe dönüştürebilmekte ve geriye kalan üçte ikisini düşük sıcaklıktaki ısı kuyusuna atmaktadırlar. Endüstriyel işletmelerin büyük bölümünde enerji ihtiyacı ayrık olarak karşılanmaktadır. Ayrık üretim nedeniyle sistemlerin toplam verimleri düşmekte ve enerji kayıpları meydana gelmektedir. Kurulacak santralde elektrik üretimi için gaz motoru kullanan ve motor ceket soğutma suyu ile egzoz gazlarını kullanan bir trijenerasyon sistemi önerilmektedir. Bu tezde, elektrik ihtiyacını tamamen şebekeden sağlayan, buhar ihtiyacını ise doğalgaz yakıtlı kazanlardan sağlayan endüstriyel bir tesise trijenerasyon sistemi kurulması durumu için enerji, çevre ve ekonomik analizi yapılmıştır. Tasarımın birinci önceliği sistemin elektrik talebinin belirlenmesi olup daha sonra, termal enerji ihtiyaçları belirlenmiştir. Yapılan çalışmada gaz motorunun termal enerji veriminin hesaplanması ile başlanarak enerji analizleri yapılmış ve tasarlanan sistemin fizibilitesi hazırlanmıştır. Söz konusu işletmenin mevcut durumda 57,6 milyon kWh yıllık elektrik tüketimi, 28,9 milyon kWh ısı ve 20,4 milyon kWh soğutma ihtiyacı bulunmaktadır. Önerilen trijenerasyon sistemi ile yılda 850.000 € tasarruf sağlanarak, yılda 50,7 milyon kWh elektrik, 28,6 milyon kWh termal üretim gerçekleştirilecek ayrıca 9,9 milyon kg karbondioksit ise daha az salınacaktır. Yapılan çalışmanın sonuçları incelendiğinde ve literatür verileri ışığında, %12,96 birincil enerji tasarrufu sağlandığı görülmüş ve elde edilen sonuçlar ile tasarruf potansiyeli ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Enerji Analizi, Enerji Tasarrufu, Enerji ve Çevre, Kojenerasyon, Trijenerasyon.

ANALYSIS OF TRIGENERATION SYSTEMS IN TERMS OF ENERGY, ENVIRONMENT AND ECONOMICS

ABSTRACT

When studied the traditional energy production power plants consuming fossil fuels can only convert one-third of fuel energy into useful work. The remaining two thirds of low temperature thermal energy convecting low temperature sink reservoir. The need for energy in the most of the industrial enterprises is supplied discrete. Due to discrete energy production, the total efficiency of the power system is reduced and inclined power losses. The plant consist of a gas engine based trigeneration system that uses both engine jacket water and engine exhaust gases. In this thesis, for an industrial facility which provides electrical needs completely from the circuit and steam needs of the system with natural gas fired boilers systems' energy, environmental and economic analysis was performed. The first priority is estimation of electrical demand for the system. Afterwards thermal demands identified. In this study, making energy analysis started with calculation of gas engines thermal efficiencies then prepared feasibility analysis of the implemented system. In the current situation, the system needs 57.6 million kWh of annual electricity consumption, 28.9 million kWh heat and 20.4 million kWh of cooling per year. With the proposed trigeneration system 850.000 € savings, 50.7 million kWh electricity, 28.6 million kWh thermal production will be achieved. In addition, 9.9 million kg less carbon dioxide will be released. When the results of the studies examined and comparison with literature data, 12.96% primary energy savings achieved and results obtained have revealed energy saving potential.

Keywords: Energy Analysis, Energy Conservation, Energy and Environment, Cogeneration, Trigeneneration.

GİRİŞ

Enerji günümüz dünyasında insan yaşamı için vazgeçilmez bir önem arz etmektedir. Enerji tüketim hızı her geçen gün artmakta ve tüm dünyada enerji pazarı giderek büyümektedir. Bu kapsamda yeni ve ileri teknolojiler geliştirilerek artan enerji ihtiyacı sorunu için çözüm arayışları devam etmekte olup ulusal ve uluslararası birçok kuruluş enerji sorununa dikkat çekmektedir. Bu konuda düzenlenen yasal mevzuatlar, bilimsel araştırmalar ile süreç iyileştirme çalışmalarının her biri enerji sorununa bir çözüm bulmak ve sürdürülebilir bir enerji arzı sağlamak için yapılmaktadır.

Ülkemizdeki enerji tüketimindeki artış hızı ise Avrupa Birliği ve Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü gelişmiş ülkelerinin enerji tüketimi artış hızının iki katıdır. Elektrik enerjisinde ise bu değer dört kat olarak karşımıza çıkmaktadır. Gelişmişlik düzeyinin bir ölçütü olan enerji tüketimi aynı zamanda enerji yoğunluğu kavramının da bileşenidir. Enerji yoğunluğu gayri safi milli hasıla başına tüketilen enerji miktarıdır ve enerjinin verimli kullanılmasında temel bir göstergedir [1].

Ülkemiz toplam enerji tüketimi verilerine göre, fosil kaynaklı enerji üretim sistemleri ilk sıradadır. Ayrıca 2012-2023 dönemi için enerji verimliliği strateji belgesinde enerji verimliliğinin arttırılması ve 2023 yılında enerji yoğunluğunun 2011 yılı değerlerine kıyasla en az %20 azaltılması hedeflendiği belirtilmektedir. Bu kapsamda belirlenen stratejik amaçlarla, sanayi sektörleri ile hizmetler sektöründe enerji yoğunluğunu ve enerji kayıplarını azaltarak tasarruf potansiyellerinin belirlenip enerji verimliliğine yönelik uygulanabilecek önlemlerin belirlenmesi amaçlanmıştır [2]. Yapılacak çalışmalar için teşvik mekanizmaları oluşturulmuş ve belirlenen hedeflerin objektif olarak doğrulanabilir performans başarı göstergeleri ve doğrulama araçları belirtilmiştir.

Sanayileşmenin artmasıyla, enerji tüketimine duyulan ihtiyaç artmış olup mevcut elektrik şebekelerindeki arz ve dağıtım sorunları ile küresel enerji rekabeti ve iklim

değişikliği konularındaki belirsizlik ve sorunlar dünyayı alternatif arayışlarına yönlendirmektedir [3]. Bu sebeple ülkemiz, gelişmişlik seviyesini ve sanayi üretimini arttırmak, aynı zamanda birim ürün başına harcanan enerjiyi azaltmak durumundadır. Enerji yoğunluğu olarak ifade edilen birim ürün başına enerji tüketimini azaltmak, yatırım ortamlarının iyileşmesi, sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması ve enerji kaynak güvenliğinin tesis edilebilmesi açısından önem arz etmektedir. Bu konuda yapılabilecek çalışmalardan en önemlisi ise endüstriyel enerji verimliliğinin yükseltilmesidir.

Enerji kaynakları konusundaki dışa bağıllık, dışarıdan temin edilen birincil enerji kaynağının en verimli şekilde kullanılmasını gerektirmektedir. Günümüzde bir enerji kaynağı olarak görülmeye başlanan enerji verimliliğinin artırılması ise bu yolda ilk adımdır. Bu maksatla, üretimden tüketime kadar birçok ısı geri kazanım ünitesi ile aydınlatma sistemleri geliştirilmiş, motor sürücülerini kullanılmış, hava yakıt optimizasyonu sağlanmış ve endüstriyel tesislerde uygulanmıştır. Bu sayede, birincil enerji kaynağı olarak kullanılan yakıtlardan yanma sonucu elde edilen enerjiden, doğru bir tasarımla maksimum düzeyde yararlanılabilmektedir.

Bu uygulamalardan günümüzde yaygınlaşmakta olan bir uygulama örneği ve teknoloji ise trijenerasyon yani güç, ısıtma ve soğutmanın birlikte üretildiği sistemlerdir. Bu türden sistemlerin yaygınlaşması ile sanayide dolayısıyla ülkemizde mevcut enerji kaynaklarının daha verimli olarak kullanılması mümkün olmaktadır. Bu tez çalışmasında ise hali hazırda elektrik enerjisi ihtiyacını şebekeden sağlayan, buhar ihtiyacını ise doğalgaz yakıtlı bir kazandan, soğutma ihtiyacını ise buhar sıkıştırılmalı mekanik soğutma sistemi ile karşılayan bir endüstriyel işletmede kurulması planlanan trijenerasyon sisteminin enerji, teknik, ekonomik ve çevresel analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatür verileri ve hesaplama yöntemleri aracılığıyla karşılaştırılarak uygun motor seçimi yapılmıştır. Atık ısı kazanı ile buhar üretimi potansiyeli hesaplanmış ve üretilebilecek soğutma enerjileri ile tesisin mevcut ihtiyaçları göz önünde bulundurulduğunda yılda elde edilebilecek ekonomik ve çevresel faydalar sunulmuştur.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Kojenerasyon Sistemlerinin Tanımı

Kojenerasyon, tek bir ısı kaynakından birleşik ısı ve güç üretimi demektir. Kojenerasyon, (Combined Heat and Power, CHP); üretim sistemine giren enerji ile elektrik enerjisi veya mekanik enerjinin yanında faydalı ısı enerjisinin de eşzamanlı olarak üretilmesidir. Kojenerasyon sistemleri ile enerji verimliliği sağlanmasının yanında yüksek oranda yakıt tasarrufu sağlanabilmektedir. Birlikte üretim teknolojisi, niceliği yüksek ısı kaynağının çevre ile eşit şartlara getirilinceye kadar geçen süreçte, birim faydalı iş üretimi için tüketilen enerjinin azalmasıyla çevrenin korunması açısından da daha yararlı bir üretim sistemi haline almaktadır [4].

Tarihsel süreç boyunca elektrik üretimi ve ısı üretimi sistemleri gelişme göstermiş uygulama alanları artmıştır. Ancak bu iki enerjinin ayrı sistemlerde üretimi birincil enerji kaynağının verimli kullanımını kısıtlamaktadır. Günümüzde ortaya çıkan yaklaşım ise ayrık üretim sistemlerinde meydana gelen kayıpların önlenmesi amacıyla elektrik enerjisi üretim santrallerinde atık ısı kaynaklarının da farklı ısıtma ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla kullanılmasıdır. Buradaki yaklaşımla aynı enerji kaynağını kullanarak elektrik ve ısı enerjisinin birlikte üretimi sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır.

Günümüzde birlikte üretim sistemleri için kombine çevrim esasına gören çalışan santrallerde birincil elektrik üretimi için güç ünitesi olarak gaz türbini, buhar türbini ve içten yanmalı motorlar yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Güç ünitelerinin elektrik üretimi esnasında yüksek sıcaklıktaki yanma gazları ve soğutma çevrimi suları ise atık ısı kazanlarında sıcak su veya buhar üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu durumda sistem verimleri tek çevrimli konvansiyonel üretim santrallerine göre artmaktadır.

Günümüzde elektrik santrallerinin atık ısı kaynakları, proses ihtiyaçları için kullanılarak birincil enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Bazı üretim santrallerinin atık

ısıları ise bölgesel ısıtma maksadıyla kullanılmaktadır [6]. Bu sayede hem tesis verimleri yükselerek maliyetler azalmakta hem de ülke ekonomisine büyük katkılar sağlanmaktadır.

Kojenerasyon sistemleri mikro ölçekten büyük ölçekli santral ölçeklerine kadar ihtiyaca yönelik olarak tasarlanabilmektedir. Kurulacak sistem, tesisin ihtiyaçlarının belirlenmesi ile boyutlandırılarak seçim yapılmaktadır [7]. Yapılan uygulamalarda, elektrik ve ısı ihtiyacının karşılanmasının yanında termal depolama sistemleri üzerinde de çalışmalar yapılmıştır. Bu sayede sistemin toplam veriminin artacağı ve enerji tasarrufu sağlanarak emisyonların azaltılabileceği belirtilmiştir [8].

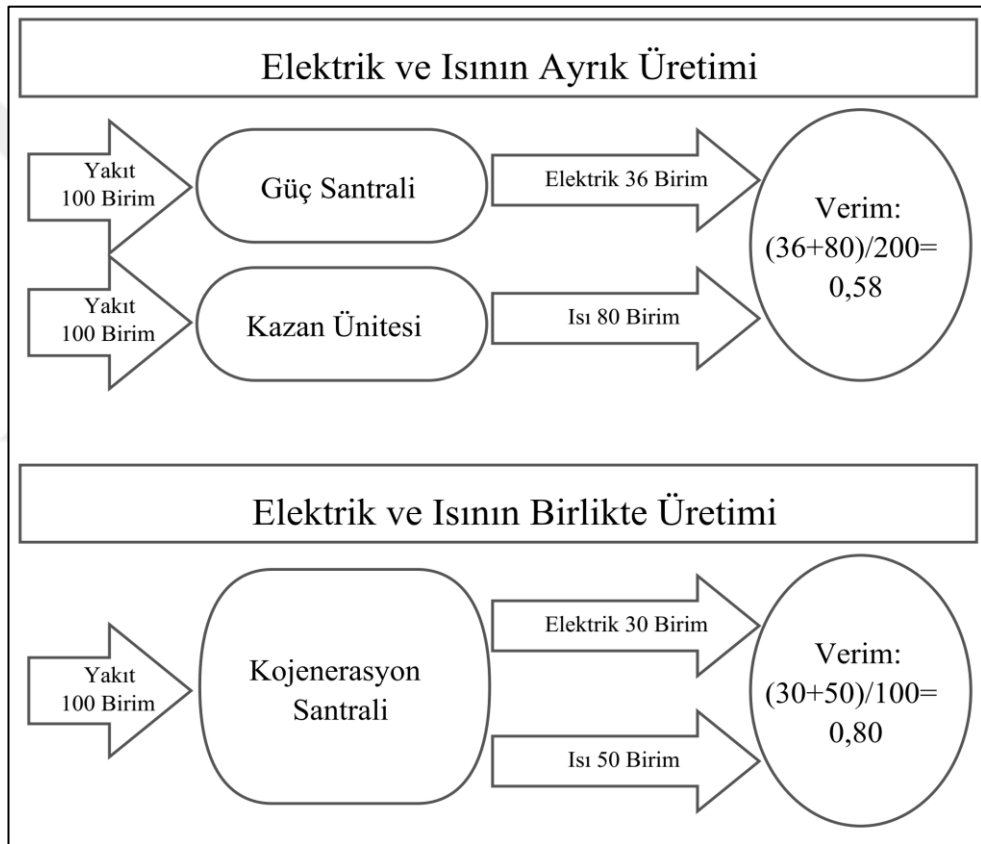
1.1.1. Kojenerasyon sistemlerinin tarihsel gelişimi

Dünyada kojenerasyon sistemlerinin tarihsel gelişimi ise, 1900'lü yılların ilk yarısında görülmüştür. Daha sonra yeni fosil yakıtların ve sahalarının keşfi nedeniyle ve yakıt maliyetlerinin düşmesiyle bu sistemlere rağbet azalmıştır. Sonrasında enerji verimli teknolojilere yönelik ve üretim teknolojilerinde yeni arayışlar ilk olarak 1973 yılında Petrol İhraç Eden Arap Ülkeleri Birliği'in ilan ettiği petrol ambargosu ile meydana gelmiştir. 1979 yılında ise yeni bir petrol krizinin meydana gelmesi ile alternatif teknolojilere ve tasarruf tedbirlerine yönelik ivme kazanmıştır [9].

Uzun yıllardır dünya üzerindeki birçok üretim tesisi başta olmak üzere, kamusal hizmet binaları, alışveriş merkezleri gibi sayısız kuruluş kojenerasyon sistemlerini tercih etmektedir. Bu sayede, elde edilen ekonomik kazancın yanı sıra çevrenin korunmasına da katkı sunmaktadır. Kojenerasyon isminden de anlaşılacağı üzere birlikte üretim sistemi olup, enerjinin hem ısı hem de elektrik formunda eşzamanlı olarak birlikte üretilmesidir. Kojenerasyon sistemleri ile üretilen enerji, bu iki enerjinin ayrı ayrı sistemlerde ve yerlerde üretilmesinden daha ekonomik olmaktadır. Bir başka deyişle, sadece elektrik üretebilen bir sistem, kullandığı yakıt enerjisinin ortalama % 30 ile % 40 kadar kısmını elektrik enerjisine dönüştürebilmektedir [10]. Geleneksel elektrik üretim tekniğinden farklı olarak, kojenerasyon sisteminin tercih edilmesiyle sistemden atılacak atık ısının da büyük kısmının faydalı ısı olarak kullanılmasıyla sisteme giren enerjinin % 70 hatta % 90'lara kadar kullanılabileceği yapılan birçok uygulamada da görülmüştür.

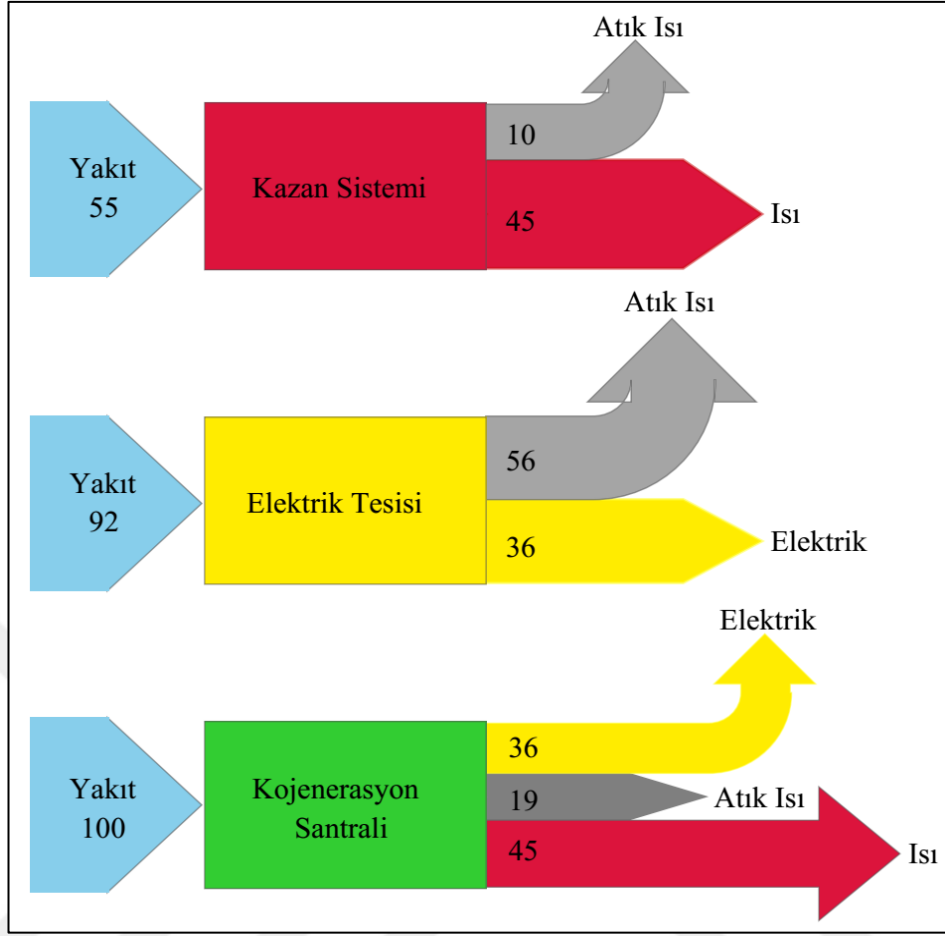
Kojenerasyon sistemlerinin temel amacı, elektrik üretimi esnasında açığa çıkan atık ısıların da yararlı bir iş için kullanıma sunulmasıdır. Böylelikle atılan ısıdan ısıtma, kurutma, buhar eldesi, bina ısıtması olarak faydalanılabilir.

Bu sayede santralin ekonomisinin artmasının yanında çevreye atılan emisyonların azalması ve enerji verimliliğinin artması da sağlanmaktadır [11]. Örneğin konvansiyonel bir üretim santrali için elektrik ve ısının ayrı olarak üretildiği durum için ve birlikte üretim durumu için yakıt girdileri ve verimleri aşağıdaki gibi şematize edilebilir.



Şekil 1.1. Üretim metoduna göre toplam sistem verimi

Enerji üretim sistemlerinde konvansiyonel metot ile kojenerasyon metodu sayısal değerler ile verilmiştir. Şekil 1.1’de görüldüğü üzere, elektrik ve ısının ayrı olarak üretilmesi için her iki üretim sistemine de yakıt girdisine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak birlikte üretim metoduyla aynı yakıt girdisiyle elektrik ve ısının eşzamanlı olarak üretilmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca mevcut sistemler ile kojenerasyon sistemlerinin şekilsel gösteriminde sankey diyagramı adı verilen yöntemle de gösterilebilir.



Şekil 1.2. Ayrık üretim ve kojenerasyon uygulaması sankey diyagramı

Şekil 1.2’de görüldüğü üzere, geleneksel güç üretim metoduyla belirli miktarlarda elektriksel ve ısıl enerjiye ihtiyaç duyan tesisin ihtiyacı, konvansiyonel sistemlerle karşılanmak istendiğinde daha fazla yakıt girdisi gerekirken, kojenerasyon tekniği sayesinde yüz birimlik yakıt girdisi aynı faydalı gücün üretiminde yeterli olabilmektedir. Daha düşük yakıt tüketimi sayesinde, geleneksel santral sistemlerine göre salınan emisyonlar azalmakta ve hem çevresel hem de ekonomik anlamda tasarruf sağlanabilmektedir.

Geleneksel santrallerde elektrik üretimi için kullanılan birincil enerjinin %70’lere varan kısmı atık ısı olarak bırakılmaktadır. Birlikte üretim sistemlerinde ise elektrik üretimi esnasında açığa çıkan atık ısılar, eşanjörler aracılığıyla tesislerde ısı ihtiyacı bulunan yerlerde kullanılabilir [12]. Örneğin; sıcak su ihtiyacı, ortam ısıtma ihtiyacı, buhar ihtiyacı, kurutma ihtiyacı, nemlendirme nem alma gibi gereksinimleri karşılamada kullanılabilir.

Birlikte üretim sistemlerinin tasarımları optimize edildiğinde birim yakıt girdisinden %80-%90'lara varan verim sağlanabilmektedir. Bu türden yüksek sistem verimleri sayesinde tesislerin yatırım giderlerinin karşılanması ile geri ödeme süreleri, 2-3 yıl gibi kısa sürelerde mümkün olabilmektedir [5, 13].

Günümüzde halen birçok endüstriyel işletme elektrik ihtiyaçlarını enterkonnekte şehir şebekelerinden sağlamakta ve ısıtma, soğutma, nemlendirme ve kurutma gibi ihtiyaçlarını ise kendi tesislerinde işletimlerini sürdürdükleri ayrı sistemlerden sağlamaktadırlar. Ulusal şebekelerden alınan elektrik hizmeti ülkemizin gelişmekte olması, artan nüfus ve enerji ihtiyaçları gibi nedenlerle kimi zaman kesintilere uğramakta ve büyük üretim tesisleri açısından dur kalk yapmanın zorluğu yanında, zaman ve işgücü kayıpları dolayısıyla maddi kayıplara uğramaları söz konusu olmaktadır. Ayrıca şehir hatlarının üretim seviyelerinin üst noktalara çıktığı puant talep anlarında aşırı yüklenmesi elektriğin kalitesinde bozulmalara neden olmaktadır.

Ülkemizde mevcut iletim hatlarının hızla artan enerji ihtiyacı ve hat yükleri ile trafo kapasitelerinin dolmasına ek olarak uzun ve eski iletim hatları nedeniyle meydana gelen kayıp-kaçak oranlarındaki artış ile ek vergiler gibi hususlar nedeniyle mevcut şebekeden alınan elektrik enerjisinin, ekonomikliğini yitirmesine ve arz güvenliği sorunlarına neden olmaktadır. Düşük verimli santrallerde üretim yapılması çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir. Bununla birlikte, enerjinin kalitesinin bozulması tesislerin mevcut ekipmanlarına zarar vermesi yanında toplam sistem verimleri ile üretim kapasitelerini doğal olarak karlılıklarını düşürebilmektedir. Ayrıca ulusal şebekeden alınan enerji, üretim yapan ve yüksek enerji tüketen tesisler için maliyetlerin yükselmesi noktasında önemli bir gider olup enerjinin pahalılığı bu türden tesislerin sürdürülebilirliğini tehlikeye atabilmektedir.

Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı, enerjinin sürekli, düşük maliyetli ve kaliteli üretimi ile arz güvenliğinin kalite ile buluşması birlikte üretim sistemleri ile sağlanabilecektir. Birlikte üretim sistemlerinin avantajları ise şu şekilde sıralanabilir:

Üretim ile tüketim noktasının yakınlığı nedeniyle iletim ve dağıtım kayıpları en aza inmektedir. Yerinde üretim sistemlerinin kullanım için rejime girme süresi ulusal şebekede meydana gelebilecek kesintinin tekrar beslenmesine kıyasla daha kısa sürmektedir.

Santral çevrim verimlerinin yüksek olması nedeniyle enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Dağıtık üretim sayesinde ülke açısından arz güvenliğine katkı sağlanmaktadır. Kurulan enerji üretim sistemi için tasarım aşamasında farklı enerji kaynak türleri ile çalışabilir şekilde projelendirilmesi mümkün olup enerji kaynak güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Enerji, vergiler, kayıp-kaçaklar ve diğer masraflar düşünüldüğünde daha ucuz ve kaliteli olarak üretilebilir [14, 15].

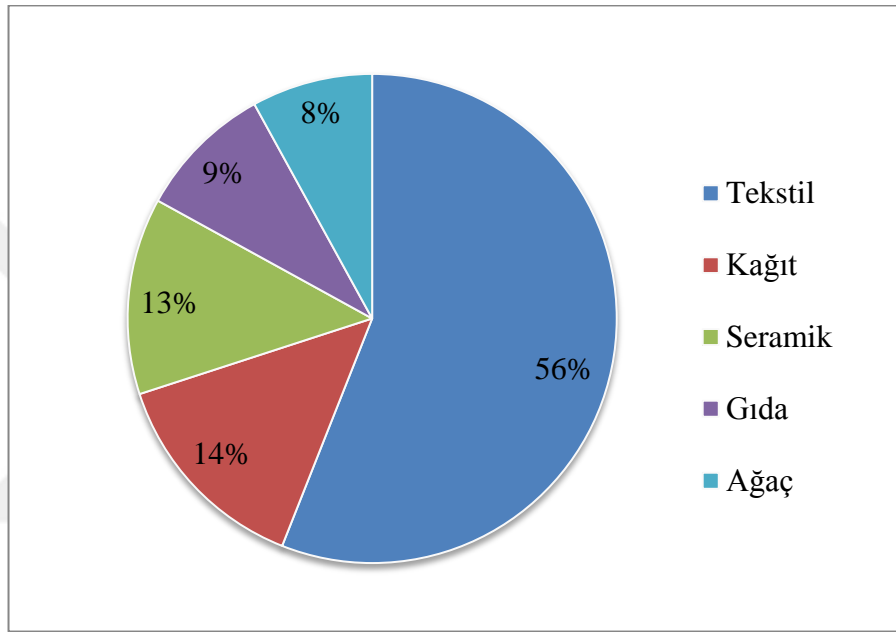
Ulusal şebeke ile paralel çalışabilir bu sayede mahsuplaşma yoluyla ek gelir elde edilebilir. Firmanın enerji gider kalemlerini düşürerek ürün kalitesi ve miktarında azalma olmadan ürün başına maliyetle birlikte enerji yoğunluğu azalır. Yerinde üretim ve tüketim sistemleri sayesinde uzun iletim ve dağıtım hatları ile bakım maliyetlerinin azalmasını sağlar. Elektrik enerji kalitesi açısından tesis bünyesindeki sistemler gerilim ve frekans dalgalanmalarına maruz kalmaz. Yüksek sistem verimleri sayesinde yatırımların geri ödeme süreleri kısa olup, uzun vadede ise karlılıkları yüksektir. Kojenerasyon sistemlerinin verimlerinin yüksek olması sayesinde, çevresel olarak emisyonlar ve çevre kirliliği sorunları en aza indirgenebilmektedir. Tesis kendi elektriğini üretebilmesi sayesinde enterkonnekte şebeke üzerinde dalgalanmalara neden olmaz. Toplam sistem verimlerinin yüksek olması ve ikincil enerji üretiminde azalan enerji maliyetleri sayesinde ülke ekonomisinin gelişimine katkı sağlar [14, 15]. Ülkemizde sektörlere göre kojenerasyon sistemleri ile sağlanan enerji tasarrufu şu şekilde verilmektedir:

Tablo 1.1. Kojenerasyon sistemi uygulanan sektörlerde enerji tasarrufu [16]

Sektörler	Enerji Tasarrufu Oranı
Çimento Sanayisi	%45
Porselen ve Seramik Sanayisi	%40
Demir-Çelik Metal Ana Sanayi	%35
Demir-Çelik Dışı Metal Ana Sanayi	%35
Dokuma, Giyim Eşyası ve Deri Sanayi	%25
Kimya-Petrol, Kauçuk ve Petrol Ürünü Sanayi	%25
Gıda Sanayi	%20
Kağıt, Kağıt Ürünleri ve Basım Sanayi	%20
Metal Eşya ve Makine-Teçhizat Sanayi	%10

Tabloda görüldüğü üzere, enerji ihtiyacının en yoğun olduğu çimento, demir-çelik sanayisi, kimya-petrol, kauçuk üretim sektörü gibi alanlarda enerji tasarrufu oranları da yüksek miktarda gerçekleşmektedir.

Söz konusu sistemlerde, elektrik ihtiyacının yanı sıra yüksek oranda ısı tüketimleri de mevcut olup birlikte üretim teknolojilerinin kullanımı ile yüksek oranlarda yakıt tasarrufu sağlanabilmektedir. Sektörel bazda bakıldığında, ağır sanayi ve hammadde sanayi ürünlerinin enerji tüketimlerinin de yüksek olduğu ve bu türden tesislerde enerjinin etkin kullanımı ile birincil enerji tasarrufu sağlanabileceği görülebilmektedir. Ülkemizde kojenerasyon sistemlerinin kullanıldığı alanlar ise grafiksel olarak bakıldığında Şekil 1.3'te verilmektedir.



Şekil 1.3. Ülkemizde kojenerasyon tesisleri kullanım alanları [17]

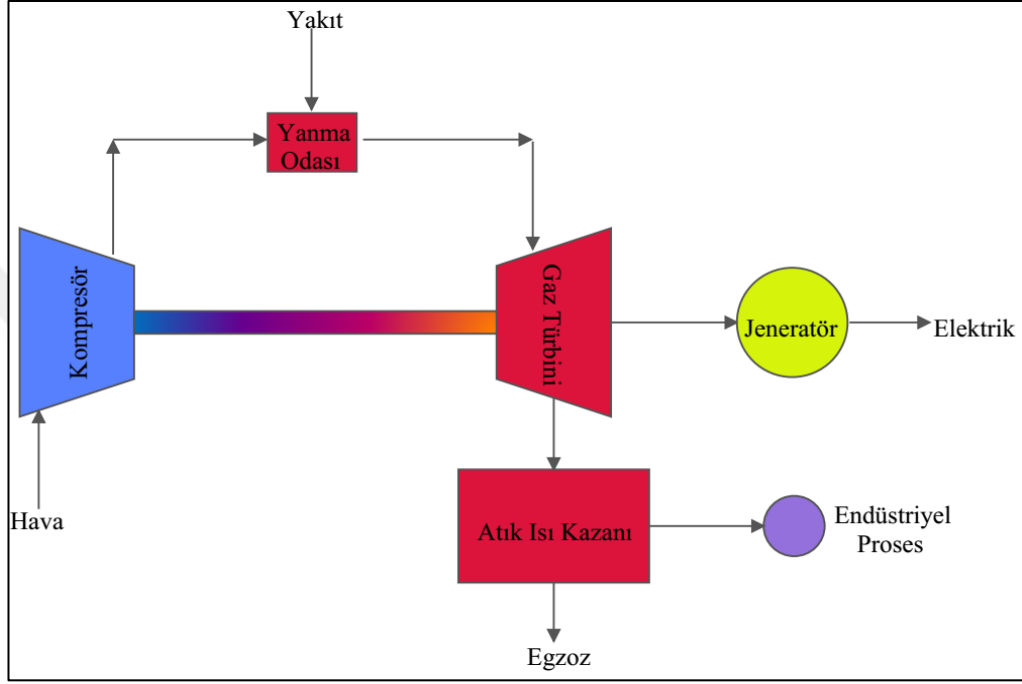
Şekil 1.3'te görüldüğü üzere, enerjinin yüksek miktarda kullanıldığı ağır sanayi alanlarından ziyade tekstil, seramik gibi ikinci derecede yoğun tüketime sahip alanlarda kojenerasyon tesisi uygulaması yapılmaktadır.

1.1.2. Elektrik üretim sistemine göre kojenerasyon sistemleri

Kojenerasyon sistemlerinde yapılan araştırmalar ve uygulama örnekleri neticesinde elektriği üreten temel güç ünitesi ekipmanı olarak en çok kullanılan ana bileşen sistemin adlandırılmasında öncü olmaktadır. Bunlar;

- 1- Gaz Türbinli Kojenerasyon Uygulaması
- 2- Buhar Türbinli Kojenerasyon Uygulaması
- 3- Gaz/Dizel Motorlu Kojenerasyon Uygulamasıdır.

Kojenerasyon tesislerinin en önemli kısmını oluşturan ekipman olarak en yaygın uygulama örneklerinin görüldüğü bu üç sistemin de temel amacı sistemin temel elektrik ihtiyacının üretimini gerçekleştirmektir. Bu sistemlere ilave olarak dıştan yanmalı stirling motorları ve yakıt hücreleri de eklenebilir [5]. Bu sistemlerden gaz türbinli örnek bir kojenerasyon tesisinin akış şeması şu şekilde verilebilir:



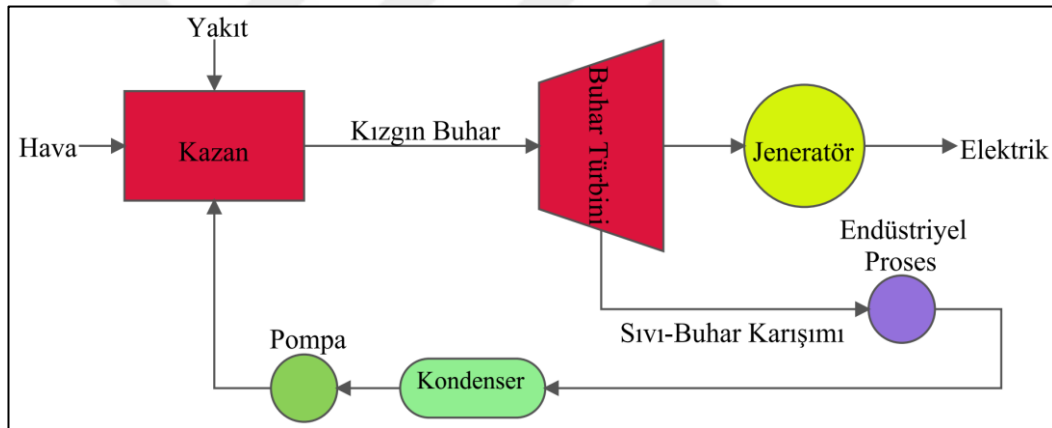
Şekil 1.4. Gaz türbinli kojenerasyon sistemi şeması

Kojenerasyon sistemlerinin diğer önemli bir parçası ise atık ısı kazanlarıdır. Atık ısı kazanları kullanılan güç üretim ekipmanının egzoz çıkışına monte edilmektedir. Atık ısı olarak güç üretim sisteminden çıkan gazlar, proseste kullanılacak buhar üretiminin temini için veya buhar kazanı besleme suyu ön ısıtıcısı gibi alanlarda kullanılabilir. Buhar türbinleri ise, kombine çevrim uygulamalarında görülüp gaz türbininin egzozundan çıkarak gaz türbininin arkasındaki atık ısı kazanında üretilen yüksek basınçlı buharın enerjisi ile çalışmaktadır. Buhar türbinini bu aşamada ikinci defa elektrik üretimini gerçekleştirmektedir.

Gaz türbinli kojenerasyon sistemlerinde akış işlemi, atmosferden alınan havanın filtre edilerek gaz türbininin kompresör kısmına girmesi ve burada sıkıştırılma işlemi sonucunda yanma odasına gönderilmesi ile başlar.

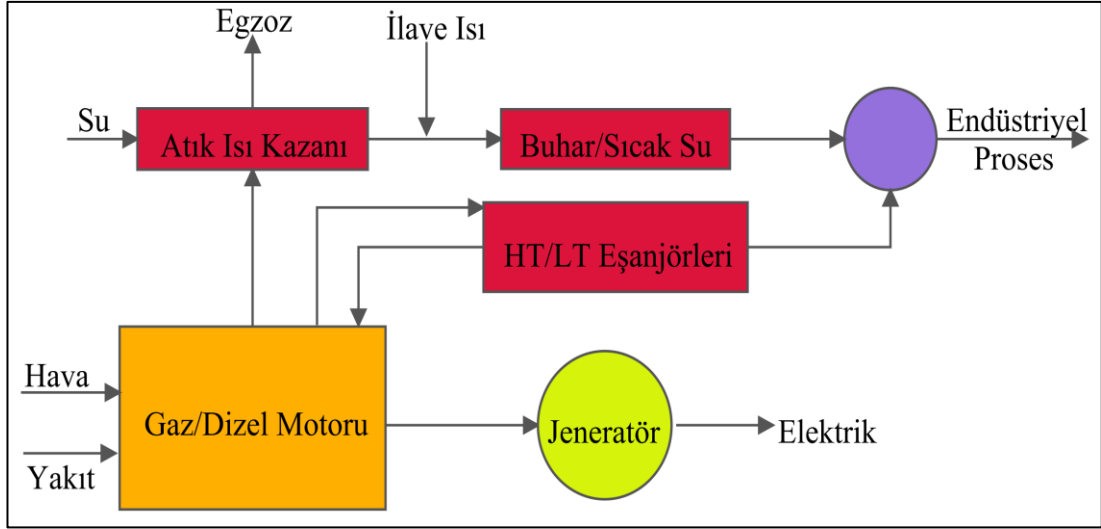
Yanma odasında ise yakıt verilerek, sıkıştırılmış hava ile yakıtın odada yanması sağlanır. Yanma sonu ürünü olarak yüksek sıcaklıktaki yaklaşık (1.700-1.800 °K) ve yüksek basınçtaki gazlar bu turbomakinanın kanatçıklarından geçerek türbini döndürür. Gaz türbininden çıkan ve halen sıcak olan yaklaşık (700-800 °K) sıcaklıktaki atık gazlar atık ısı kazanına verilmektedir [18]. Atık ısı kazanında enerjisini bırakan gazlar ise kazanın bacasından atmosfere atılmaktadır.

Atık ısı kazanlarının tasarımları çok farklı olabilmektedir. Prosesle ilgili birkaç kademeden oluşan farklı basınç kademeleri ile çalışan tipleri mevcuttur. Atık ısı kazanında gaz akışı yatay ve dikey olarak yapılabilmektedir. Atık ısı kazanlarının bakım ve işletmeleri, üretilen buharın basınç seviyesine göre sızdırmazlığı ve ısı transfer katsayısını arttırmak gibi konularda çalışmalar günümüzde devam etmektedir [19].



Şekil 1.5. Buhar türbinli kojenerasyon şeması

Buhar türbinli kojenerasyon sisteminde ise yakma sistemi olarak kazanda üretilen buhar, buhar türbininde elektrik enerjisi üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Buhar türbinli sistemlerinde buhardan maksimum faydanın alınabilmesi için türbin basınç kademeleri mevcuttur. Buhar santralinde tasarımına göre ara kızdırıcılar, basınç kademeleri, açık ve kapalı besli suyu ısıtıcıları gibi çevrimin verimini arttıracak sistemler mevcuttur. Ayrıca rankin çevrimi olarak adlandırılan su-buhar döngüsünün tamamlanabilmesi için türbinden çıkan ıslak buharın enerjisi bir miktar daha prosesle kullanılmakta daha sonra açık veya kapalı su kullanımına göre kondens dönüşü taze besli suyu ile beslenerek tekrar kazana pompa yardımıyla basınçlandırılarak gönderilmektedir [20].



Şekil 1.6. Gaz/Dizel motorlu kojenerasyon sistemi şeması

Kojenerasyon uygulamalarında en çok tercih edilen sistemlerden bir tanesi de gaz/dizel yakıtlı içten yanmalı motorlarla uygulanan kojenerasyon sistemleridir [5]. Burada yakıt ve hava içten yanmalı motorda yakılarak motora akuple olarak bağlı bulunan jeneratörde elektrik üretilmektedir. Gaz motoru arkasına bağlanan atık ısı kazanı yardımıyla prosesin ihtiyacı olan sıcak su veya buhar üretimi yapılmaktadır. Motor üreticilerinin kataloglarından hareketle gaz motorundan 350-750°C sıcaklıklarında çıkan atık gazın enerjisi atık ısı kazanında alınarak egzoz gazları atmosfere 120-160°C civarında salınmaktadır [21].

Kataloglarda verilen egzoz gazı kazanımı miktarı, atık gazın ortalama özgül ısıları ile standartlarına göre 120°'ye kadar soğutulmasıyla elde edilebilecek ısı miktarıdır. Bu değer baca içerisinde kükürt korozyonu oluşumunu ve yoğuşmayı engellemek için yapılan birçok uygulamada alt limit olarak alınmaktadır. Ayrıca gaz motoru sistemlerinin yardımcı ekipmanlarından olan yüksek sıcaklık (HT) devresi, ve düşük sıcaklık (LT) devresinden alınan motor ceket soğutma suyu ve yağlama devresi soğutma suları da ısı değiştiriciler yardımıyla yine endüstriyel prosesin ihtiyaç duyduğu alanlarda kullanılmaktadır.

1.1.3. Kojenerasyon sistemlerindeki güç kaynaklarının özellikleri

Kojenerasyon sistemleri, hem endüstriyel anlamda hem de konut veya bölgesel ticari uygulama alanları içerisinde uygulama alanı bulmuştur. Kojenerasyon sistemlerinde

bu uygulama alanlarında güç kaynağı olarak, içten yanmalı motorlar, stirling motoru, buhar türbini, gaz türbini, gaz motoru ve yakıt pilleri kullanılmaktadır [22].

Tablo 1.2. incelendiğinde kojenerasyon sistemlerinde kullanılan motorların karakteristik özellikleri yanında maliyet karşılaştırmaları da görülmektedir. Ayrıca, trijenerasyon sistemleri hakkında yapılan araştırmalarda, içten yanmalı motorların düşük yatırım maliyetli olduğunu ve kısmi yüklerde de yüksek verimle çalışabildikleri belirtilmiştir [5].

Gaz türbinlerinin ise değişken yüklere uyum sağladıklarını ve çok yüksek güç uygulamalarında kullanılabildiğini, buhar türbinlerinin ise esnek bir yakıt yelpazesine sahip olduğunu, çok uzun yıllar kullanım ömrüne sahip olduklarını, kısmi yük elektriksel verimlerinin düşük olması nedeniyle küçük tipte güç uygulamalarında tercih edilmediği söylenebilir [5, 22-24].

Tablo 1.2. Kojenerasyon sistemleri için güç kaynaklarının özellikleri [22, 23]

Özellikler	İçten Yanmalı Motor	Stirling Motoru	Buhar Türbini	Gaz Türbini	Mikro Türbin	Yakıt Pili
Büyüklik(kW)	<75000	1-55	50-250000	50-250000	3-250	5-2000
Güç verimi(%)	22-40	~35	15-38	22-36	18-27	30-50
Toplam verim(%)	70-80	60-80	80	70-75	65-75	55-80
Elektrik verimi(%)	70-80	-	75	50-70	50-70	55-80
Güç/Isı oranı	0,5-1	1,2-1,7	0,1-0,3	0,5-2	0,4-0,7	1-2
Kısmi yük	Uygun	İyi	Uygun	Zayıf	Uygun	İyi
Yakıt basıncı (kPa)	7-310	>14	-	689-3447	345-552	3,4-310
Yakıt tipi	Doğalgaz, Biyogaz, Propan	Bütün Yakıtlar	Bütün Yakıtlar	Doğalgaz, Biyogaz, Propan, Petrol	Doğalgaz, Biyogaz, Propan, Petrol	Hidrojen, Doğalgaz, Propan, Metanol
Gürültü	Yüksek	Orta	Yüksek	Orta	Orta	Düşük
Güç yoğunluğu (kW/m ²)	35-50	-	>100	20-500	5-70	5-20
CO ₂ (kg/MWh)	504-651	4-260	-	525-680	725	430-490
NO _x (kg/MWh)	0,23-9,9	0,18-0,91	-	0,14-0,5	0,18	0,0045-0,014
Yol verme süresi	10s	-	1h-1gün	10dk-1h	60s	3h-2gün
İşletme ve bakım gideri(\$/kWh _e)	0,009-0,022	-	<0,005	0,0041-0,011	0,012-0,025	0,032-0,038
Bakım zamanı(saat)	25000-50000	-	>50000	25000-50000	20000-40000	32000-64000
Kullanım süresi(yıl)	20	-	>25	20	10	10
Bulunabilirlik(%)	92-97	85-90	~100	90-98	90-98	>95
Isı çıktısı	Sıcak su, Düşük basınçlı buhar	-	Düşük/yüksek basınçlı buhar	Isı, sıcak su, düşük/yüksek basınçlı buhar	Isı, sıcak su, düşük/yüksek basınçlı buhar	Sıcak su, düşük/yüksek basınçlı buhar
Atık ısı sıcaklığı(°C)	38-128	-	-	316-649	204-260	40-1000
Kojenerasyon için yararlanılabilir sıcaklık(°C)	82-360	-	-	260-593	204-338	60-371
Yatırım maliyeti(\$/kW _e)	1100-2200	4-120	430-1100	970-1300	2400-3000	5000-6500
Isı geri kazanımı için ek maliyet(\$/kW)	Gaz motoru için 75-150	-	-	100-200	75-350	Dahil
Isı çıktısı(kJ/kWh)	3376-5908	-	1055-52753	3376-7174	4748-6858	1900-4431
Anahtar teslim maliyet(\$/kW) (Isı geri kazanımsız)	350-1000	-	-	650-900	600-1100	1900-3500

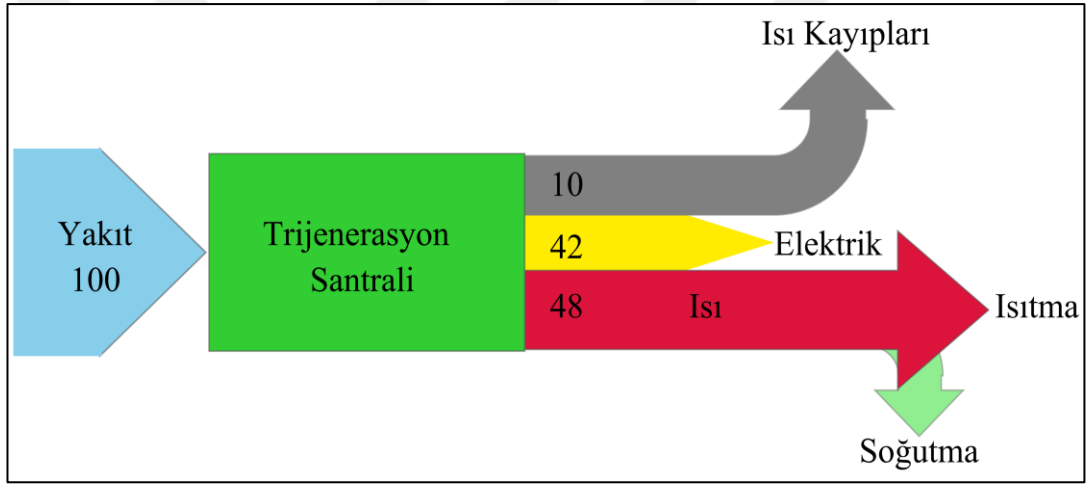
1.2. Trijenerasyon Sistemleri

1.2.1. Trijenerasyon sistemlerinin tanımı

Trijenerasyon kelime karşılığı olarak üçlü üretim anlamına gelmektedir. İngilizce kaynaklarda Combined Cooling Heat and Power (CCHP) olarak bilinmektedir. Trijenerasyon sistemi, kojenerasyon sistemlerinin gelişmiş bir versiyonu olarak soğutma sisteminin eklenmiş halidir. Kojenerasyon olarak bilinen sisteme, soğutma sisteminin eklenmesiyle faydalı üç enerji çıktısının bir arada tek bir sistemde

üretilebilmesidir. Birlikte üretim sistemlerinde olduğu gibi aynı yakıt girdisi ile elektrik, ısı ve soğutmanın eş zamanlı olarak üretilmesidir. Enerji maliyetlerinin yüksek olduğu ülkelerde trijenerasyon yani üçlü üretim sistemlerinin kullanımı maliyet etkin bir yaklaşımdır [22, 25, 26].

Trijenerasyon sistemlerinde, elektrik üretimi esnasında açığa çıkan atık ısı kullanılarak hem ısıtma hem de soğutma enerjisi üretilmektedir. Isı enerjisinin kullanımı geleneksel metodlarla farklı şekillerde olup, soğutma enerjisinin üretimi için çiller grubuna ihtiyaç vardır. Üçlü üretim sistemleri, hastanelerde, hava alanlarında, fabrikalarda, otellerde, alışveriş merkezlerinden toplu konutlara kadar birçok alanda kullanılmaktadır [24].



Şekil 1.7. Trijenerasyon santralinin sankey diyagramı prensip gösterimi

Şekil 1.7’de görüldüğü üzere, santralde üretilen elektriğin yanında ısı olarak açığa çıkan enerjinin bir bölümü doğrudan ısı ihtiyacı için kullanılırken bir bölümü ise soğutma enerjisi üretimi için kullanılmaktadır. Birçok üretim tesisinde uygulaması yapılan trijenerasyon sistemlerinin ekonomi, enerji ve çevre açısından sayısız yararları mevcuttur. Bunlardan bazıları:

- Yüksek oranda enerji tasarrufu sağlar.
- Kesintisiz elektrik üretimi sağlar.
- Yakıt çeşitliliği sunabilmektedir.
- Yüksek oranda verimli üretim yapılıır.
- Yerinde üretim sistemi sayesinde iletim, dağıtım kayıpları asgari düzeydedir.
- Aynı yakıt ile daha fazla faydalı iş üretilmesi nedeniyle sera gazı salınımları azdır.

- Montaj süreleri ve bakımları kısadır.
- Geri ödeme süreleri yüksek verimli olmaları ve enerji tasarrufu sağlamaları sebebiyle kısadır [27].

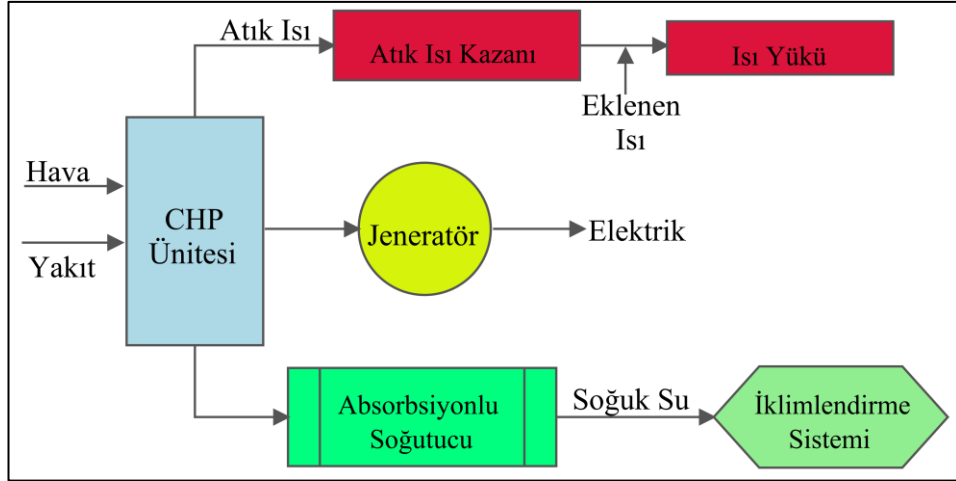
Trijenerasyon sistemlerinin sayısız avantajlarının yanında hem ülkemiz hem de dünyada uygulama açısından bazı bariyerler de mevcuttur. Bunlardan bazıları:

- Trijenerasyon sistemleri hakkında yeterince bilgi sahibi olunmayışı,
- Mevzuatlardaki belirsizlikler ve meydana getirdiği zaman kayıpları,
- Teknik konularda yetersiz ve yanlış bilgiler,
- Trafo kapasiteleri ve otomasyon hataları nedeniyle şebekeye bağlanma sorunları,
- Doğalgazlı sistemler açısından fiyatlardaki belirsizlikler ve arz güvenliği sorunları,
- Bilgi yoğun üretim teknolojileri içeren ekipmanların varlığı ve ithalata bağımlılık,
- Bilgi paylaşımının olmaması ve tanınırlığı konusundaki eksiklikler,
- Teşvik mekanizmalarının etkin olmayışı gibi nedenlerle bu türden sistemler hak ettiği derecede yaygınlaşma imkanı bulamamaktadır [28, 29].

1.2.2. Trijenerasyon sistemlerinin çalışma prensibi

Trijenerasyon sistemleri, kojenerasyon sistemlerine benzer olarak çalışmaktadır. Kojenerasyon tekniğinde temel olarak dört adım bulunurken, trijenerasyon sistemlerinde beş adım bulunmaktadır. Öncelikle güç ünitesinde mekanik güç üretilmektedir. Üretilen mekanik güç ile jeneratör tahrik edilerek elektrik üretilmektedir. Isı üreten sistemlerden çıkan ısılar atık ısı sistemleri ile kullanılabilir hale getirilir. Atık ısının bir kısmı ısıtma veya buhar üretimi için kullanılır. Atık ısının diğer bölümü ise ihtiyaca ve tasarıma göre yardımcı bir sistem aracılığıyla soğutma gereksinimlerinin karşılanması için kullanılır.

Kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin her ikisi de hem doğalgaz hem de biyogaz gibi yenilenebilir enerji metodlarıyla üretilen kaynaklar ile çalıştırılabilmektedir. Genel olarak tipik bir türbin veya içten yanmalı bir pistonlu motoru çalıştırarak jeneratörde elektrik üretir. Bu sistemler kömür yakıtlı sistemlere göre %40 daha az sera gazı emisyonları yaymaktadır [29].



Şekil 1.8. Trijenerasyon sistemi genel akış şeması

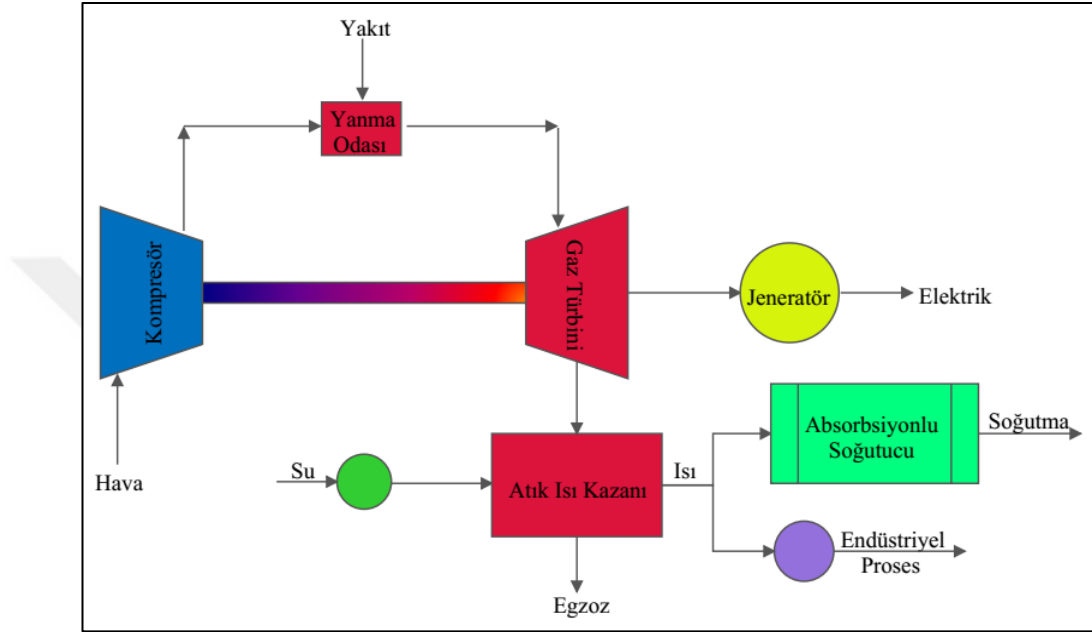
Şekilde görüldüğü üzere trijenerasyon sisteminde, kojenerasyon sistemine benzer olarak üretilen elektrik ve ısı absorpsiyonlu soğutucu sisteminin de eklenmesiyle üçlü üretim halini almaktadır.

Şekilde görülen sistemde, CHP ünitesi herhangi bir güç ünitesi olup uygulamaya göre buhar türbini, gaz türbini, içten yanmalı motor, stirling motoru gibi sistemler olabilir. Başlıca dört bileşenden oluşan bu sistem, güç üretim ünitesi, soğutma ünitesi, ısı ünitesi ve elektrik jeneratörü ekipmanlarından oluşur. Trijenerasyon sistemleri kullanılan güç üretim ekipmanına göre isimlendirilirse, gaz türbinli trijenerasyon sistemi, buhar türbinli trijenerasyon sistemi, gaz motorlu trijenerasyon sistemi olarak sınıflandırılabilir.

1.2.2.1. Gaz türbinli trijenerasyon sistemi çalışma prensibi

Gaz türbinli trijenerasyon sistemleri, güç ünitesi olan gaz türbininin 1930'lu yıllarda ilk olarak tasarlandıklarından bu güne gelişim göstermiştir. 1940 ve 1950'li yıllarda yapılan ilk gaz türbinleri malzeme sınırları, kompresör tasarımlarındaki hata ve verimsizlikler, türbin sistemlerinin verimsizlikleri gibi sebeplerle toplam verimleri %17 civarındaydı. Türbin sistemlerinin yakıt yelpazesinin genişliği nedeniyle birçok mekanizması üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Elektrik üretimi amaçlı ilk gaz türbini 1949 yılında Oklahoma'da birleşik çevrimli bir güç santralının parçası olarak kurulmuştur. Bu yıllarda kurulan türbinler düşük verime sahiptiler ve gaz türbinlerinin çevrim verimlerini arttırmaya yönelik çalışmalar genel olarak üç alanda yoğunlaşmıştır:

- 1- Türbin giriş yanma sıcaklığının artırılması,
 - 2- Turbomakinaların (türbin ve kompresör)'ün verimlerinin artırılması,
 - 3- Temel çevrimde ara soğutma, rejenerasyon gibi değişikliklerin yapılmasıdır.
- Yapılan çalışmalar neticesinde 1990'lı yıllarda türbin ısı verimleri %33'e kadar çıkmıştır [20].



Şekil 1.9. Gaz türbinli trijenerasyon sistemi temel akış şeması

Şekil 1.9'da görülen gaz türbinli trijenerasyon sisteminde, kompresör tarafından alınan havanın sıkıştırılarak yanma odasına gönderilmektedir. Daha sonra yanma odasında yakıt ile karışarak yüksek basınç ve sıcaklıktaki yanma reaksiyonu sonucu gazların türbin kanatlarını döndürme hareketiyle akuple jeneratörde elektrik üretilmektedir. Gaz türbinlerinin güç çıktıları diğer güç ünitesi tiplerine kıyasla daha yüksek güç aralıklarına çıkabilmektedir.

1.2.2.2. Buhar türbinli trijenerasyon sistemi çalışma prensibi

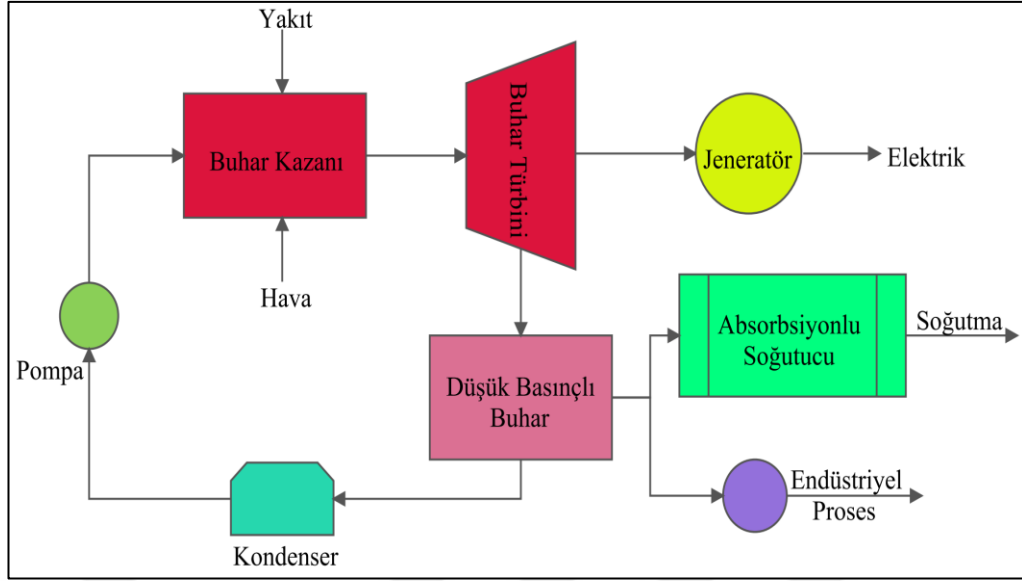
Geleneksel termik enerji üretim santralleri, yakıtın enerjisinin aracı bir akışkana aktarılması ve akışkana aktarılan enerjinin türbinde radyal veya aksenal harekete ve bu hareketin alternatörler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüşümü prensibiyle çalışmaktadır. Burada gerçekleştirilen çevrim buhar türbinli çevrim için Rankin Çevrimi olarak adlandırılmaktadır. Rankin çevriminin verimi, buharın maksimum sıcaklığı ile ısı kaynağından alınan ve sıvı-buhar karışımının yoğuşturularak düşük

sıcaklıktaki ısı kuyusuna atılan sıcaklık aralıklarında tanımlanan ve “Carnot Verimi” olarak adlandırılan teorik maksimum verim ile sınırlıdır. Gerçek hayatta uygulamalarda ise proseste yer alan sürtünme, ısı kayıpları, basınç kayıpları, buhar kaçakları gibi tersinmezlikler ile türbin ve alternatörlerin dönüşüm verimlerinin limitleri nedeniyle teorik maksimum verim değerine ulaşmamaktadır [30].

Gerçek sistemlerde meydana gelen tersinmezlikler nedeniyle, buhar türbinlerinde elektriksel verim değerleri %7-20 civarında olup, trijenerasyon sistemlerinde toplam verimleri %60-80 aralığındadır [24]. Buhar türbini, buharın akış enerjisini mekanik enerjiye ve ona bağlı olan aynı mil üzerindeki jeneratöre aktararak elektrik üretir. Su buhar döngüsünü kondenser adı verilen yoğuşan çürük buharın ısı kuyuya atıldığı noktadan başlatacak olursak, kondenserde yoğuşarak sıvılaştıran suyun besli suyu basınçlandırma pompaları ile kazana iletilmesi ile döngü başlar. Kazanda yakıt ve havanın bir araya gelerek kızdırdığı borulardan geçen su kızdırıcılardan geçerek kızgın buhar halini alıncaya kadar enerji alır. Sonra buhar türbinine gelen buharın türbin kanatlarına çarparak enerjisini aktarmasıyla, üretilen mekanik enerji mil üzerinde bağlı bulunan jeneratöre aktararak elektrik enerjisi üretilir. Türbin sisteminde bulunan ara kızdırma, ara buhar alma kademeleriyle sistemin toplam verimi arttırılır. Son olarak türbinden çıkan sıvı-buhar karışımı kondensere gönderilerek kelvin-plank ifadesine göre çevrim tamamlanır.

Trijenerasyon sistemlerinde ise türbinden alınan ara kademeler aracılığıyla proseste ısı çekilebileceği gibi doğrudan absorpsiyonlu soğutucuya da gönderilebilir. Klasik sistemde kondensere gönderilen sıvı-buhar karışımı sistem tasarımına göre türbinden alınarak ısıtma ve soğutma işlemlerinin yapılması amacıyla kullanılabilir.

Şekil 1.10’da görülen buhar türbinli trijenerasyon sistemine göre, diğer güç üretim kaynaklarına göre buhar türbinli sistemlerde çok çeşitli yakıt türleri ile çalışılabilmektedir. Bu avantajı nedeniyle düşük elektriksel verimlerine rağmen, elektrik üretimi yan ürün olarak görülmekte ve termal ihtiyaçların yüksek olduğu yerlerde tercih edilmektedir [5].

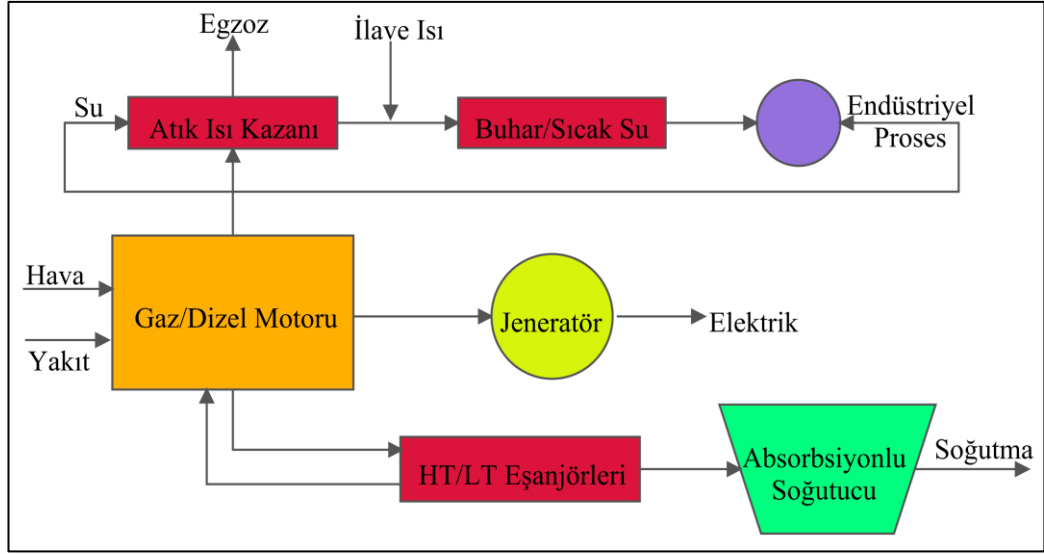


Şekil 1.10. Buhar türbinli trijenerasyon sistemi temel akış şeması

1.2.2.3. Gaz motorlu trijenerasyon sistemi çalışma prensibi

Gaz motorları otto çevrimi prensibine göre çalışan motorlardır. Otto çevrimi ise buji yardımıyla ateşlemeli motor çevrimidir. İlk olarak 1862’de Beau de Rochas tarafından önerilen çevrim, 1876’da dört zamanlı olarak Nicolaus A. Otto’nun tasarladığı ve günümüze kadar gelen motor Otto’nun adını taşımaktadır [31]. Bu motorlar buji yardımıyla içeriye alınan hava ve yakıt karışımını ateşleyerek krank miline bağlı pistonları yukarı ve aşağı yönlü hareketinden dönme hareketini aktarma organlarına iletir. Otto motorlarda günümüzde benzin, doğalgaz, biyoetanol, biyogaz, sentez gazları ve çöp gazları gibi yakıtlar yakılabilmektedir [15].

İçten yanmalı bir motor tipi olan gaz motorlarında Otto veya Miller çevrimleri kullanılarak enerji üretimi gerçekleştirilmektedir. Motorun içerisinde bulunan silindire emme supabından alınan hava ve yakıt karışımı bir buji yardımıyla ateşleme vasıtasıyla yakılmakta ve oluşan yüksek basınç etkisiyle piston hareket etmektedir. Yanma işlemi sonucunda egzoz supabı açılarak yanma sonu ürünlerinin yani egzoz gazının tahliyesi yapılır. Kam milinin dönmesine bağlı olarak hareket eden emme supabının açılması ile çevrim tekrar başlamış olur. Pistonların motor tipine göre yukarı aşağı, ileri geri veya ‘v’ şeklinde hareketi biyeler yardımıyla krank miline aktarılarak hareket enerjisine dönüştürülmektedir [32]. Dönme hareketi milden elektrik jeneratörüne aktarılarak elektrik enerjisi üretimi sağlanmaktadır.



Şekil 1.11. Gaz motorlu trijenerasyon sistemi temel akış şeması

Şekil 1.11’de görülen gaz motorunun miline bağlı bulunan jeneratörden alınan elektriğin yanında, gaz veya dizel motorun ceket ısısından, yağlama sistemi ve turbo şarj sisteminden alınan ısı ile egzozundan çıkan yüksek sıcaklıktaki ısı enerjisi yardımcı sistemler aracılığıyla kullanılabilir. Gaz motorlarının elektriksel verimleri gaz türbinleri ve buhar türbinlerine oranla daha yüksek olup trijenerasyon sistemlerinde kullanımı yaygındır.

1.3. Gaz Motorlu Trijenerasyon Sistemlerinin Bileşenleri

Trijenerasyon sistemlerinde tercih edilen güç üretim araçlarından biri gaz motorlu sistemlerdir. Gaz motorları tasarımları itibariyle benzinli motorlarla aynı çalışma prensibine dayanmaktadır. Bu motorlarda kullanılan yakıtlar, düşük sıkıştırma oranlarında buji yardımıyla ateşlenerek iş üretebilecek yakıtlardır. Bunlardan en bilinen ve mevcut trijenerasyon uygulamalarında sıklıkla kullanılan çeşidi doğalgazdır. Doğalgaz yanında farklı yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen biyogaz veya sentez gazlarını da yakabilmektedir [15].

Bu türden farklı yakıtların yakılması için gaz motorları üzerinde hava yakıt oranlarının ayarlanması gibi basit ayarlamalar yapılabilmektedir.

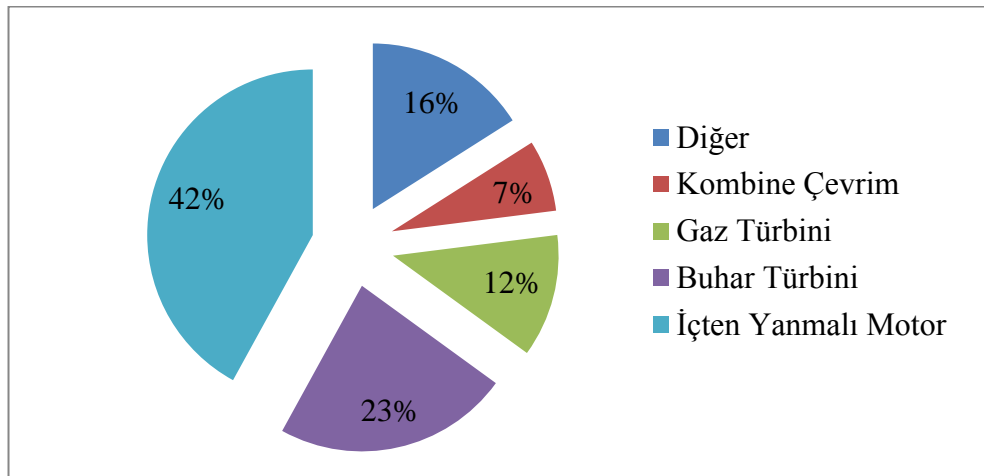
Şebekeden beslemenin başlamasıyla beraber devreden çıkarılarak enterkonnekte şebekeden tesis enerjisini karşılamaya devam eder.

Endüstriyel tesislerde kullanılan dizel jeneratörler çalışma tiplerine göre farklılık gösterebilmektedir. Bunlar ISO 8528/1 standardına göre şu şekilde gruplandırılmıştır;

- Stand by,
- Prime,
- Continuous tipte çalışmadır.

Stand by çalışma tipi santralde meydana gelen kesintide değişken yüklerde sınırlı süre çalışabilmektedir. Bu motorların çalışma süreleri yılda maksimum 500 saat civarında olup ortalama %70 yük değerlerinde çalıştırılmaktadır. Bu motorlara aşırı yüklemeye yapılmaz. Prime tipi motorlar ise, değişken yükler ile daha uzun süreli çalışabilmektedir ve %70 yük civarlarında çalıştırılmaktadır. Bu motor tipinde aşırı yüklemeye de yapılabilmektedir. Continuous tip motorlar sürekli çalışma şartlarına uygun tasarlanmaktadır ve genelde sabit yük altında %100 yükle çalıştırılmaktadır. Bu tipte motorlarda aşırı yüklemeye yapılmaz ancak bir yıl süre ile bakımları yapıldığı takdirde aralıksız olarak kullanılabilir [34].

Yukarıda bahsedilen jeneratör çalışma tipleri gaz motorlarında da mevcuttur. Gaz motorları da aynı sınıflandırma ile ISO 8528-1:2005 tebliğinde çalışma tipleri tanımlanmıştır. Gaz motorlarının da kullanılması planlanan endüstriyel tesisin ihtiyacına göre seçimi yapılabilmektedir.



Şekil 1.13. Dünyada trijenerasyon için tercih edilen güç ünitesi dağılımı [5]

Şekil 1.13'te görüldüğü üzere dünyada trijenerasyon uygulamasında en çok tercih edilen güç ünitesi içten yanmalı motorlardır. Gaz motorlu trijenerasyon sistemleri kompakt sistemler olarak günümüzde piyasadan temin edilebilmektedir. Dizel sistemler genellikle acil durum ihtiyaçlarının karşılanması için yedek enerji kaynağı olarak tercih edilmektedir. Gaz motorlu sistemler ise şebeke doğalgazı, biyogaz, endüstriyel tesislerde proses sonucu oluşan farklı bileşimlerdeki sentez gazlarını yakıt olarak kullanabilmektedir.

İçten yanmalı motor gruplarında temel olarak iki çeşit motor vardır. Bunlardan bir tanesi kıvılcım ile ateşlenerek doğalgaz, propan, çöp gazı gibi yakan ve sıkıştırılmalı yakma prensibiyle dizel yakıtlı ya da ağır karbonlu bileşikler yakabilen çeşittir. İçten yanmalı bir motor tipi olan gaz motorlarında, Otto çevrimi esastır. Ayrıca silindir içine alınacak havanın miktarını arttıran Miller çevrimlerinden faydalanılarak enerji üretimi gerçekleştirilmektedir. Sıkıştırma oranı, benzinli motorlara benzer şekilde kendiliğinden tutuşma sıcaklığının altındadır. Yaklaşık olarak dizel motorlara kıyasla orta seviyelerde olup 8-12 aralığındadır. Bu sayede gaz motorunda herhangi bir vuruş söz konusu olmadan çalışabilmektedir [20, 35].

Gaz motorları, küçük güçlerden <50 kW, 6.000 kW güç aralıklarına kadar ulaşabilen sistemlerdir. Bu değer günümüzde gelişen teknoloji ile içten yanmalı motorlar genelinde altında 75 MW değerlerine kadar ulaşmıştır. Isı üretimleri güç çıkışına yakındır. Elektrik ve ısı oranlarının yüksek olması sebebiyle birçok endüstriyel uygulamada elektrik üretimi için güç ünitesi olarak kullanılmaktadır. Gaz motorları çok farklı nitelikte gaz çeşitleri ile çalışabildiği için, uygulama ve kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Farklı metan oranına sahip gazlar ile çalışabilmesi için hava yakıt oranları üzerinde ayarlamalar ile motor veriminden ödün vermeksizin kullanılabilir. Emisyon değerleri, kömür ve fuel oil yakıtlı tesislere göre veya dizel yakıtlı motorlara nazaran düşüktür. Isı elektrik oranları 1,4-2 aralığında olup bilhassa azot oksit emisyonları düşük olduğundan, çevreye olan olumsuz etkileri de azdır [22-24].

Pistonlu bir gaz motorunda yanan yakıtın birincil enerjisinin %35-40'ı mekanik güç üretimine, %30-35'i motor ceket ısısına, %25-30'u egzoz ısısına ve %7-10'luk bölümü ise ışınım enerjisine dönüşür [36].

İçten yanmalı motorların kullanıldığı trijenerasyon sistemlerinde, motorun verimli çalışabilmesi için soğutma devreleri bulunmakta ve ısı geri kazanımı için yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklık sistemleri mevcuttur. Bunlar; gaz motorunun düşük sıcaklık (LT) yağlama devresi, yüksek sıcaklık (HT) turbo şarj havası, silindir bloğu soğutma devresi ve egzoz gazlarıdır.

Bu devrelerin ısısından faydalanma metodu ise şu şekilde özetlenebilir. Motora giren enerjinin yaklaşık %10'u kadar olan kısmı yağlama yağı ile atılmaktadır. Yağlama yağları, genel olarak 70-95 °C arasındaki sıcaklıklarda çalışmaktadır. Çalışma sıcaklığının yükselmesi yağın kalitesini bozup ömrünü azaltmaktadır. Yağın sıcaklığının düşük tutulması yağ ömrünü uzatırken, geri kazanılabilir ısının miktarını ve kullanılabilirliğini azaltmaktadır. Ayrıca sıcaklığın düşmesi içerisindeki suyun yoğunlaşmasına neden olmaktadır [10]. Tasarlanan motorun optimum çalışma şartları altında işletilmesi ile hem motor verimli çalışır hem de atık olarak uzaklaştırılması gereken ısının bir kısmı geri kazanılabilmektedir.

Motoru soğutmak amacıyla motor ceketinde soğutma suyu bulunmaktadır. Motor ceketinde bulunan su, sıcaklığı yaklaşık olarak 85-95 °C aralığındadır [37]. Bu su, yanma sonucu üretilen güçten geriye kalan ve silindirlerden yayılarak motor bloğuna verilen ısının uzaklaştırılması için kullanılmaktadır. Genel bir uygulama olarak tek başına elektrik üreten sistemlerde bu ısı kuru tip radyatörler ile atmosfere verilmektedir. Birlikte üretim sistemlerinde ise bu ısının büyük bölümü kazanılarak enerji tasarrufu sağlanabilmektedir.

Gaz motorundan çıkan egzoz gazlarının sıcaklığı, 370-540°C aralığında değişmektedir. Burada atılan ısı kullanılan yakıt türüne bağlı olarak değişmekte ve geri kazanılabilir niteliktedir [24]. Egzoz gazlarının düşürülebileceği sıcaklık, üretici kataloglarında standartlara bağlı olarak doğalgaz için 120 °C ve biyogaz için 150 °C civarındadır. Söz konusu sıcaklık farkı biyogazın doğalgaza göre yüksek kükürt ile nem içeriğinin ve muhtemel kükürt korozyonunun önüne geçmek için daha yüksek olarak seçilmiştir. Trijenerasyon uygulamalarında, egzoz gazları ile yüksek sıcaklıkta su veya buhar üretimi mümkündür. Tesis ihtiyaçlarına bağlı olarak sıcaklık ve basınç değerleri seçilebilmektedir. Gaz motoru sistemlerinde bulunan temel ekipmanlar ise şu şekilde sıralanabilir.

- Yağ ön ısıtma sistemi,
- Havalandırma sistemi,
- Elastik süspansiyon sistemi,
- İlk ve son yağlama sistemi,
- Motor ceket suyu ısıtma sistemi,
- Motor gaz rampası sistemi,
- Ateşleme ve başlatma sistemi,
- Yağ seviyesi kontrol sistemi,
- Egzoz susturucusu ve egzoz sistemi,
- Soğutma sistemi şeklinde sıralanabilir [37].

Yağ ön ısıtma sistemi ile motor çalıştırılmadan önce yağlama yağını uygun çalışma sıcaklığına çıkartılır. Havalandırma sistemiyle radyasyonla yayılan ısının motor dairesinden uzaklaştırılması sağlanır. Elastik süspansiyon sistemiyle motor çalışırken oluşabilecek vibrasyonların sönümlenerek motor aksamına hasar vermesi ve gürültü seviyesinin azalması sağlar. İlk ve son yağlama sistemi ile motor çalışmadan önce yağlama sağlanarak aşınmanın en aza indirilmesi sağlanırken, son yağlama sistemiyle motor durdurulduktan sonra halen ekipmanların sıcaklığı yüksek olması nedeniyle motor aksamına zarar vermemesi için kademeli soğutma gerçekleştirilir.

Motor ceket suyu ısıtma sistemiyle motor çalıştırılmadan önce blok ısıtması yapılarak motorun ilk çalışma anından itibaren verimli çalışması sağlanır. Motor gaz rampası sistemiyle motora verilecek gazın öncelikle filtre edilmesi sağlanarak, basınç düzenleyici ile motorun çalışabilmesi maksadıyla basınçlı gazı kendi giriş gaz basınç seviyesine ayarlaması gerçekleştirilir. Ateşleme ve başlatma sistemiyle öncelikle aküden volana ilk hareket verilmek üzere motor başlatılır ve silindir içerisine alınan yakıt hava karışımları ateşlenir.

Sürekli olarak çalışan motorun yağlama özelliğinin devam edebilmesi maksadıyla yağ deposu bulunmaktadır. Gaz motoru çalışma esnasında yağ tüketimi gerçekleştikçe yedek tanktan ilave yağ alarak motoru korur. Bu maksatla yağ seviyesi kontrol sistemi bulunmaktadır. Egzoz susturucusu ve egzoz sistemi ile egzozda meydana gelen sesi susturucu absorbe eder ve egzoz sistemi yanma sonu ürünlerini ihtiyaç halinde ısı geri kazanım ünitesine, ihtiyaç yoksa üzerindeki

yönlendirici klape ile atmosfere verir. Soğutma sistemiyle motorun çalışma esnasında üretilen termal enerji motor bileşenlerinin korunması için uzaklaştırılmaktadır. Bu amaçla su pompası ve sistem su basıncını korumak amacıyla genişleme tankında, motor soğutma devresinde dolaştırılmak üzere su veya su ve etilen glikol karışımı bulunur.

1.3.2. Atık ısı kazanının çalışma prensibi

Atık ısı kazanları temelde santralde atılacak olan ısının geri kazanıldığı sistemlerdir. Bu sistemin çalışma prensibi temel ısı transferi prensiplerine dayanmaktadır. Birlikte üretim sistemlerinin vazgeçilmezi olan bu sistemler ile normal şartlar altında atmosfere atılacak olan egzoz gazlarının bir kısmının enerjisini kazanmak mümkün olmaktadır. Bu sistem ile enerji ve yakıt tasarrufu elde edilerek ihtiyaç duyulan ısı, normalde kazanda üretilecek olan ısının karşılanması amacıyla tüketilecek ve yakıttan tasarruf sağlanacaktır [10].

Atık ısı kazanları ile bilhassa kombine çevrim santrallerinde gaz türbininden egzoz olarak çıkan gazlarla buhar üretimi yapılmaktadır. Bu buhar ikinci defa elektrik üretimi amacıyla buhar türbinine gönderilmektedir. Bu sayede sistemden elde edilen elektrik miktarı artarak sistemin toplam verimi artmaktadır.

Kombine çevrim santrallerinin atık ısı kazanı bulundurmadığı sistemler en basit düzeyde santral çeşididir. Atık ısı kazanı ile günümüzde santral verimi %60'lara kadar ulaşmaktadır [23]. Brayton çevrimini esas alan ve buhar türbinini ile ikinci kez elektrik üreten kombine çevrim sistemleri yüksek verimli, ekonomik ve güvenilir bir güç üretimi sunabilmektedir [38]. Atık ısı kazanı seçiminde standart ve normlara uygunluğu kazan verimliliği ve işletme ömrü için önem arz etmektedir. Burada yapılan kazan tercihinde güncel standartlar da göz önünde bulundurularak üreticilerden referans listesi hazırlanmış ve yüksek verimli ve sektörel olarak yaygın kullanılan kazan çeşitleri incelenmiştir.

Trijenerasyon sistemlerinde, güç ünitesinin arkasına bağlanan atık ısı kazanları ile gaz motorlarından 350-550 °C'lere kadar çıkan atık gazlardan yüksek miktarlarda faydalı ısı üretimi gerçekleştirilebilmektedir.

Egzoz gazlarının ısı enerjisi ile yüksek sıcaklık ve basınçta buhar elde edilebileceği gibi, kullanım suyu maksatlı daha düşük sıcaklık ve basınçta su veya buhar temini de mümkün olabilmektedir.



Şekil 1.14. Atık ısı kazanı [10]

Kazan sistemleri yapısına göre sınıflandırılabilir. Bunlardan başlıcaları:

- Alev-duman borulu kazanlar,
- Su borulu kazanlar,
- Alev borulu kazanlar şeklinde verilebilir [39].

Bu kazan tipleri endüstride sıklıkla kullanılmakta olup genel olarak doğalgazı yakıt olarak kullanılmaktadır. Trijenerasyon sistemlerinde ise güç ünitesinin elektrik üretimi esnasında açığa çıkan atık ısı ile yakıt kullanılmadan sıcak su ve buhar üretimi yapılabilmektedir.

Yapısal olarak buhar kazanlarında bulunan doğalgaz girişi ve brülör yakma sistemi dışında yapısal benzerlik taşımaktadır. Kazanda bulunan boru demetleri ile ihtiyaç duyulan ısı, atık ısı enerjisinin aracı akışkan olarak kullanılan suya aktarılarak kullanıma sunulmaktadır. Atık ısı kazanlarında gaz geçişleri, dikey veya yatay olarak gerçekleşebilmektedir.

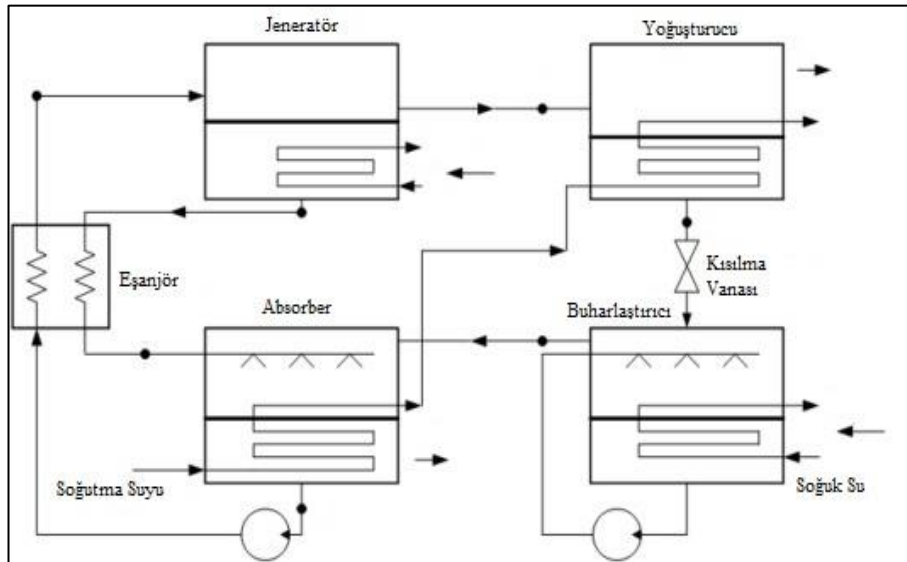
1.3.3. Adsorbsiyonlu soğutma sisteminin çalışma prensibi

Kojenerasyon sistemlerinden farklı olarak bir de soğutma grubu eklidir. Soğutma sistemlerinden en bilinenleri:

- Mekanik buhar sıkıştırırmalı soğutma sistemi,
- Adsorbsiyonlu soğutma sistemi,
- Adsorbsiyonlu soğutma sistemi,
- Ejektör soğutma sistemidir.

Bu sistemlerden, adsorbsiyonlu ve adsorbsiyonlu soğutma sistemi yakıt olarak elektrik üretim sisteminin atık ısısını kullanarak soğutma enerjisi üretimi gerçekleştirmektedir. Adsorbsiyonlu çiller sistemlerinin sektörel yaygınlığı ve rekabetçi ürün aralığı ayrıca ilk yatırım maliyetinin adsorbsiyonlu soğutma sistemlerine nazaran uygun olması nedeniyle adsorbsiyonlu bir soğutucu sistemi tercih edilmiştir. Adsorbsiyonlu soğutma sistemi soğurma işlemini yapmak için ısı enerjisine ihtiyaç duymaktadır.

Şekil 1.15'te bu sistemin çalışma prensibi şeması gösterilmektedir. Tek etkili adsorbsiyonlu çiller sistemleri, jeneratör, kondenser, evaporatör, absorber ve eşanjör elemanlarından meydana gelmektedir.



Şekil 1.15. Adsorbsiyonlu soğutma sistemi çalışma prensibi [40]

Bu türden sistemler atık ısının bulunduğu tesislerde de uygulama alanı bulmaktadır. Tarihsel süreç olarak ilk defa Michael Faraday tarafından amonyakla yapmış olduğu

deneyler esansında keşfedilmiştir. Ardından Franz Carre tarafından ise uygulaması yapılmıştır. Bu sistemde mekanik buhar sıkıştırma sisteminden farklı olarak kompresör yerine ısı kullanılmıştır [41].

Temelde iki çeşit olan bu sistemin üretilecek suyun sıcaklığına göre +4 C uygulamalarında LiBr/Su, daha soğuk dondurma uygulamalarında ise NH₃/Su çiftleri kullanılmaktadır. Amonyaklı uygulamada, amonyak soğutucu su soğurucu akışkan olarak görev yapar. LiBr uygulamada ise su soğutucu akışkan LiBr ise soğurucu akışkan olarak görev yapar. Bu sistemler; tek etkili, çift etkili ve üç etkili sistemler şeklinde sınıflandırılmaktadır. Bu etki soğutmayı sağlayan kısmın sayısıdır. Ayrıca direk yanmalı sistemler de bulunup bilhassa doğalgazın ucuz olduğu yerlerde tercih edilmektedir [42].

Sistemde buharlaştırıcıdan gelen soğutucu akışkan buharı absorberde absorbent tarafından emilir. Absorberden pompa ile jeneratöre gönderilerek burada karışım içerisindeki soğutucu akışkan ile su ayrışır. Su kondensere giderek soğutma kulesinde soğutulur ve absorbent ise tekrar absorbere geri döner [41]. Tek etkili absorpsiyonlu çiller sistemlerinin etkinlik katsayısı 0,7-1 aralığında olup güç santralinden gelen sıcak suyun giriş ve çıkış sıcaklık aralıkları (90-80 °C) ile değişmektedir. Çevrimdeki su sıcaklığının yüksek olması çillerin etkinliğini arttırmaktadır [42].

2. LİTERATÜR TARAMASI

Kong ve diğ., gaz motorlu küçük ölçekli bir jeneratör sistemi ile çalışan ve yeni tipte küçük ölçekli silika jel-su çiftli absorpsiyonlu soğutuculu sistemin performans analizini yapmıştır. Bu sistem 12 kW elektrik üretiminin yanında, 28 kW ısı kapasitesi ile 9 kW soğutma sağlamaktadır. Sistemin COP değeri 13°C'de buharlaşma sıcaklığı ile 0,3'ün üzerindedir. Sistemin toplam termal ve elektriksel verimi %70 olarak gerçekleşmiştir. Kurulan sistem mikro ölçekli trijenerasyon sistemi olup, elde edilen bulguların büyük ölçekli sistemlerin enerji ve ekonomik analizinde yol göstermesi beklenmiştir [43].

Maidment ve Tozer, bir süpermarket için öncelikle LiBr/su ve NH₃/Su çiftini kullanan absorpsiyon çiller sistemlerinin performanslarını kıyaslayarak trijenerasyon sisteminin analizini yaptıkları çalışmayla gaz türbini ile gaz motoru seçimi için yöntem hakkında çalışmışlardır. Soğutma ihtiyaçlarının değişkenliğini, çalışma sürelerini, yakıt tüketimlerini dikkate alarak istatistiksel metotlar aracılığıyla beş farklı senaryo için analizler yaparak, güç ünitesinin büyüklüğüne göre geri ödeme sürelerini, eşdeğer tam yük saatine göre geri ödeme sürelerini, eşdeğer tam yük saatine göre birincil enerji tasarruflarını kıyaslayarak analizler yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada trijenerasyon sistemi ile birincil enerji tasarrufu sağladıklarını ve CO₂ salınımlarının geleneksel sistemlere göre daha az olduğunu belirtmişlerdir [44].

Cardona ve Piacentino, trijenerasyon sistemlerinde bileşen seçimi için birincil enerji tasarrufunu dikkate alarak verim değerlerinde yaptıkları kıyaslama sonucunda trijenerasyon sistemlerinin seçiminde çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada performans kriteri olarak literatürde kullanılan formüllerden bazıları derlenmiştir. Ancak her bir yaklaşımın yalnızca tek bir enerji akışına odaklı olarak parametrelendirildiğini belirtmişlerdir. Bu yaklaşımla yönetim metodu konusunda odaklanmışlardır. Bunlardan ilki termal talep yönetimi diğeri ise birincil enerji tasarrufu yönetimidir. Çalışmada birincil enerji tasarrufu yönetimi metoduna

odaklanarak sistemin kullanım süresi boyunca maksimum enerji tasarrufuna ulaşabileceğini belirtmişlerdir. Termal enerjinin satışının çok fazla mümkün olmadığı ve yaygın olmayışı nedeniyle ve elektrik enerjisinin şebeke ile entegre olabildiği göz önünde bulundurulursa termal enerji talebi yönetimi odaklı sistemde elektrik üretiminde fazla miktarda dalgalanma görülebilir. Bu da sistemlerin yeterince doğru büyüklük boyutlandırması yapılmadıysa çok fazla kısmi yüklerde çalıştırılmaması gerektiğini sonucunu beraberinde getirebilmektedir [45].

Chicco ve Mancarella, yaptıkları çalışmada tek etkili çillerin 80-90 °C, çift etkililerin 120-160 °C derecede sıcak su ihtiyacının olması ve talep edilen sıcaklığın yüksek olması küçük ölçekli türbin veya içten yanmalı motor kullanılan sistemlerde termal verimde düşme meydana geleceğini söylemişlerdir. Ayrıca, çalışmada CO₂ emisyon indirgenmesi yani trijenerasyon uygulaması ile elde edilen kazanımı ayrık üretime göre hesaplamışlardır. Trijenerasyon sistemleri için enerji göstergeleri ifadelerini inceleyerek trijenerasyon sistemlerinde birincil enerji tasarrufunun ve CO₂ emisyonu kazanımının farkını ortaya koymuşlardır. Yapılan incelemede trijenerasyon sistemi için birincil enerji tasarrufu sistemlerde sadece verimler üzerinden inceleme yapıldığını ve verim değerlerinin oranları arasındaki ilişkinin yakıt türünü düşünmeden yapıldığını belirtmişlerdir [46].

Mancarella ve Chicco, yukarıda bahsedilen yaptıkları çalışmanın devamı niteliğindeki ikinci makalede ise bu emisyonlar üzerinden analizler yapılarak farklı senaryolar için hesaplamalar sunulmuştur. Trijenerasyon sistemleri için geliştirilen diğer bir ifade olan emisyon kazanımında ise sadece verimler arasındaki ilişki değil, ayrıca kullanılan sistemin farklı yakıt girdileri için kıyaslaması söz konusu olabilmektedir. Bu ifadenin türetilmiş halini daha da genişleterek ayrık üretim ile trijenerasyon uygulaması kıyaslamasında eşdeğer CO₂ emisyonu faktörleri tanımlanmış ve küresel ısınmada etkisi bulunan karbondioksit ve soğutma uygulamalarında tercih edilen akışkanların etkilerinin değerlendirildiği daha kapsamlı ifadeler üzerinde çalışmışlardır. Trijenerasyon sistemlerinde farklı güç üniteleri ile çeşitli standartlar ile referans olarak kullanılan elektrik üretim verimi ve ısı üretimi verim değerleri ile hem trijenerasyon için birincil enerji tüketim değerlerini hem de salınan CO₂ miktarları açısından söz ortaya koydukları senaryoları karşılaştırmışlardır. Soğutma üretiminin söz konusu olduğu trijenerasyon

sistemi için içten yanmalı motorların; tek etkili, çift etkili ve üç etkili absorpsiyonlu soğutma teknolojisi için verimlerinin yüksek olduğunu, enerjiden faydalanma faktörlerinin yüksek olarak gerçekleştiğini ve CO₂ salınımlarını önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir. Söz konusu çalışmada içten yanmalı gaz motorunun çift yakıtla (%10 dizel+%90 doğalgaz) emisyonlarının önemli ölçüde azaldığını belirtmişlerdir [47].

Rocha ve diğ., iki küçük ölçekli trijenerasyon sistemi, farklı işletme şartları altında toplam verim analizi için test etmişlerdir. 30 kW doğalgaz yakıtlı mikrotürbini ve 26 kW gücünde yine doğalgaz yakıtlı içten yanmalı motoru kullanarak test yapmışlardır. Yapılan çalışmada, her iki sistem de, 17,6 kW amonyak-su çifti kullanan bir absorpsiyonlu soğutucu kullanmıştır. Çalışma sonuçlarında, deneysel sonuçlar, doğalgaz tüketimini, çıkan net elektriksel üretimi ve termal çıktıyı, sıcak ve soğuk su üretimlerini, birincil enerji tasarrufu ile enerji kullanım faktörlerini kısmi ve tam yük koşulları altında hesaplamışlardır. Bu küçük ölçekli uygulamada, mikrotürbin uygulaması için enerji kullanım faktörü %56,3 ve birincil enerji tasarrufu %15,1 olarak gerçekleşmiştir. İçten yanmalı motor ile yapılan ikinci sistem içinse, enerji kullanım faktörü %43,7 ve birincil yakıt tasarrufunu %44,2 olarak hesaplamışlardır. İçten yanmalı gaz motorunda motor ceket termal ısını hesaplamadan yapılan çalışmada absorpsiyonlu soğutucuda istenilen enerjiden faydalanma oranı gerçekleştirilemeyerek mikrotürbin için 0,612, içten yanmalı motorda ise 0,57 olarak gerçekleşmiştir [48].

Minciuc ve diğ., trijenerasyon sistemleri için termodinamik analizlerde bulunmuşlardır. Yaptıkları çalışmada, gaz türbinli ve içten yanmalı motor seçenekleriyle çalışan absorpsiyonlu çiller kullanmışlardır. Termodinamik açıdan birçok değerlendirme kriteri üzerinde durularak en iyi enerji performansı için analizler yapılmıştır. Yaptıkları çalışmada ön kabul olarak trijenerasyon sisteminin iç ihtiyaçlarını ihmal etmişlerdir. Soğutma talebinin en yüksek olduğu durumda işlemin soğutma işleminin elektrikli sistem ile yapıldığını ve analiz edilen sistem için güç ünitesinin gaz türbini veya gaz motoru olduğunu kabul ederek teknik değerlendirmede bulunmuşlardır. Trijenerasyon sistemi için enerji performansı analizi yaparak teknik olarak literatürdeki ve standartlardaki indeksler ile teorik denklemlerle analizlerde bulunmuşlardır [49].

Calva ve diğ., yaptıkları çalışmada, ticari olarak bulunan çeşitli gaz türbinlerinin tam yük altında ve kısmi yüklerde hava akış debilerini, egzoz gazı çıkış sıcaklıklarını ve ürettikleri elektriksel çıktılara göre yapılan performans analizleri incelenmiştir. Yapılan analizlerde gaz türbin sistemi kısmi yüklerde daha yüksek verimlerde çalışabilmektedir. Sonuç olarak, sistemin maksimum verimde çalışması için birçok ünitenin ayrıntılı olarak incelenmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bu sayede minimum yatırım maliyeti ve işletme maliyeti ile kısmi yük koşulları ve tam yük koşullarında mevsimsel dalgalanmalar yardımcı kazan sistemleri gibi ekipmanlar aracılığıyla büyük yatırım maliyetlerine gerek duyulmadan ihtiyaç duyulan tüketim değerlerine ulaşılabileceğini belirtmişlerdir [50].

Pagliarini ve diğ., yaptıkları fizibilite çalışmasında bir hastanedeki doğalgaz yakıtlı kazana entegre bir trijenerasyon sisteminin analizini yapmışlardır. Gerçek tüketim değerleri üzerinde saatlik olarak sıcak su, buhar ve elektrik yüklerini çıkartmışlardır. Sistemin analizini ve soğutma ile ısıtma yüklerini belirlemeyi saatlik bazda çıkartmak yerine TRNSYS yazılımı ile bulunduğu bölgedeki iklimsel koşulları da göz önünde bulundurarak çıkartmışlardır. Yaptıkları çalışma ile en yüksek enerji tasarrufunu 7 MW toplam nominal kapasite olarak belirlemişlerdir. Bu boyutun üzerindeki kapasite seçiminin geri ödeme sürelerinin İtalya'daki enerji fiyatları nedeniyle uzun olduğunu belirtmişlerdir [51].

Suarez ve diğ., yaptıkları çalışmada ise, sistemin elektriksel olarak detaylı analizini yapmışlardır. Trijenerasyon sistemlerinde en önemli konunun elektriksel yükün büyüklüğü ve dağılımı olduğunu bu nedenle sistemde puant yük anlarında ve kısmi yüklerde talebi karşılayabilecek şekilde bir güç ünitesi seçilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Doğru boyutlandırma için talep eğrisinin ve çalışma periyotlarının önemli olduğunu ve hafta sonları ile hafta içlerinde yürütülen çalışma periyodunun farklı olduğunu tespit etmişlerdir. Buradan hareketle, toplam maksimum talep yükünün 250,13 MW değerlerine ulaştığını hesaplamışlardır. Termal yükleri de hesaplayarak, kurulacak sistemin enlem değerlerine göre solar radyasyon eğrilerini de dikkate almışlardır. Yaptıkları tasarımda sistemi gaz türbinini güç ünitesi seçerek yapmışlar ve üç adet gaz türbini ile bunların atık ısılarından buhar üreterek sürdürdükleri bir buhar türbini ile sistemi boyutlandırmışlardır. Sonuç olarak yaptıkları çalışmada, otuz dakikalık periyotlarla çalışarak, birincil enerji talebini azaltarak çevresel etkileri

de en aza indirmişlerdir. Tasarladıkları trijenerasyon sistemi için geri ödeme sürelerini bularak elde edilen değerin kabul edilebilir olduğunu ve mevcut şartlarda bu türden sistemlerin ömürlerinin 15 yıl civarında olduğunu belirtmişlerdir [52].

Yapılan araştırmalarda, literatürde sistem tasarımı için birçok yaklaşım kullanıldığı görülmüştür. Ancak bu yaklaşımlardan hiç birisi için kesin sonuçlar verdiğini söylemek mümkün değildir. Öncelikle trijenerasyon uygulaması yapılacak sistemin tüketim değerleri detaylı olarak analiz edilmelidir. Ekipman seçimleri yapıldıktan sonra elektrik ve ısı talep yönetim metodları ile sistem işletilmelidir.

Yapılan araştırmalarda sistem tasarımı açısından ekonomik analiz kısmına gereken dikkat gösterilmeden enerji analizi yaklaşımı genel kanı olarak benimsenmiştir. Ticari kaygılar taşıyan işletmeler için enerji tasarrufu mali anlamda tasarruf anlamını taşımaktadır. Bununla birlikte optimum işletme senaryosunun sağlanması ve bunun parasal karşılığının da görülmesi gerekmektedir. Yalnızca enerji tasarrufu odaklı değil aynı zamanda şebekeye mahsuplaşma ile çalışan ve değişken dalgalı yük profiline sahip işletmelerin analizleri daha detaylı olarak yapılmak zorundadır. Bu çalışma kapsamında tüketim değerlerinin detaylı analizi yapılmış ardından ekipman seçimi yapılarak işletme metodu hakkında karar verilmiştir.

3. MEVCUT DURUM ANALİZİ VE KURAMSAL BİLGİLER

Saha ziyareti gerçekleştirilen endüstriyel tesiste öncelikle sistemin birincil enerji tüketimlerinin hesaplanabilmesi amacıyla tüketim verileri alınmıştır. Yapılan ziyaretlerde, tesis işletmecilerinin talepleri dikkate alınarak bünyelerinde bulunan ısıtma, soğutma sistemleri incelenmiştir. Elektrik ve doğalgaz faturaları ile ayrıca kendi bünyelerindeki sayaçlarla oluşturdukları saatlik değerlerden oluşan veriler incelenerek güç ünitesinin seçimi ve boyutlandırma çalışması yapılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında elektrik ihtiyacını tamamen şebekeden, buhar ihtiyacını bünyesindeki buhar kazanlarından ve soğutma ihtiyacını elektrikli çillerler ile sağlayan bir endüstriyel tesisin son üç yıla ait saatlik tüketim verileri incelenmiş, elektrik ısı oranları göz önünde bulundurularak bir trijenerasyon sistemi önerilmiştir. Söz konusu sistemde elektriksel güç talebinin ortalama değeri referans alınarak, ihtiyaç duyulan elektriği üretilecek şekilde tasarlanmıştır. Elektrik talebinin puant anlarında ise şebekeden elektrik enerjisi alınarak sistem sürdürülmüştür. Şebeke elektriğinin kesintiye uğraması ihtimali göz önünde bulundurularak, dizel jeneratörler mevcut sistemle senkron olarak çalışacak şekilde tasarıma gidilmiştir.

Elektrik Piyasası Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği kapsamında kurulacak sistemle muhatapların sayısı azaltılarak üç ay gibi kısa bir sürede izin işlemleri tamamlanabilmektedir. Lisanslı üretim sürecinde ise izin ve lisans işlemlerinin sürelerinin bir yıl civarında tamamlanabileceği daha önce bu türden sistemleri kuran firma ve işletmeler ile yapılan görüşmeler neticesinde görülmüştür. Tasarlanan sistemde lisanssız üretim ile ada modu çalışma senaryosu firma tarafından talep edilmiştir. Burada üretilen elektriğin fazlası şebekeye verilemeyeceği için sistem seçiminde yapılan analizlerde maksimum elektrik güç talep miktarı ve ortalama yük talebinin üzerinde bir boyutlandırma güç ünitesinin uzun süreli olarak kısmi yüklerde çalışmasına neden olacaktır. Kısmi yük durumlarında çalışma hem emisyon değerlerini artırdığı gibi hem de yakıt tüketimini etkilemektedir.

3.1. Elektrik Tüketim Profili

2014 ve 2015 yıllarına ait saatlik bazda tüketim verileri alınarak hepsi kWh enerji biriminde toplam enerji tüketimi olarak aşağıdaki gibi verilmiştir. Mevcut durumun analizi mevsimsel olarak incelenmek üzere, üçer aylık periyotlarda sunulmuştur.

Öncelikle yapılan çalışmada 2014 yılı verileri için sistemin toplam elektrik enerjisi tüketimi, ısı enerjisi tüketimi ve soğutma enerjisi tüketimi hesaplanmıştır. Söz konusu işletmede, 2015 yılı için analizler tekrarlanmış ve ortalama değerler çıkartılmaya çalışılmıştır. Elektrik tüketimi için firmaya ait kayıtlar incelenmiştir. Isı enerjisi birkaç farklı şekilde incelenmiş ve hem ısı enerjisi hem de aylık ve yıllık profil olarak toplam ton buhar tüketimleri incelenmiştir. Soğutma enerjisi tüketiminde ise firmada mevcut soğutma ünitelerinin enerji tüketimleri değerleri ile performans katsayıları (COP) dikkate alınarak hesaplama yapılmıştır. Soğutma sistemi için elektrikli çiller sisteminin ürettiği soğutma enerjisinin profili incelenmiş ve 2014 yılı için bir yıllık üretim profili sonucunda performans katsayısı COP = 4,01 olarak gerçekleşmiştir. 2014 yılı için elektrik enerjisi şu şekilde özetlenebilir.

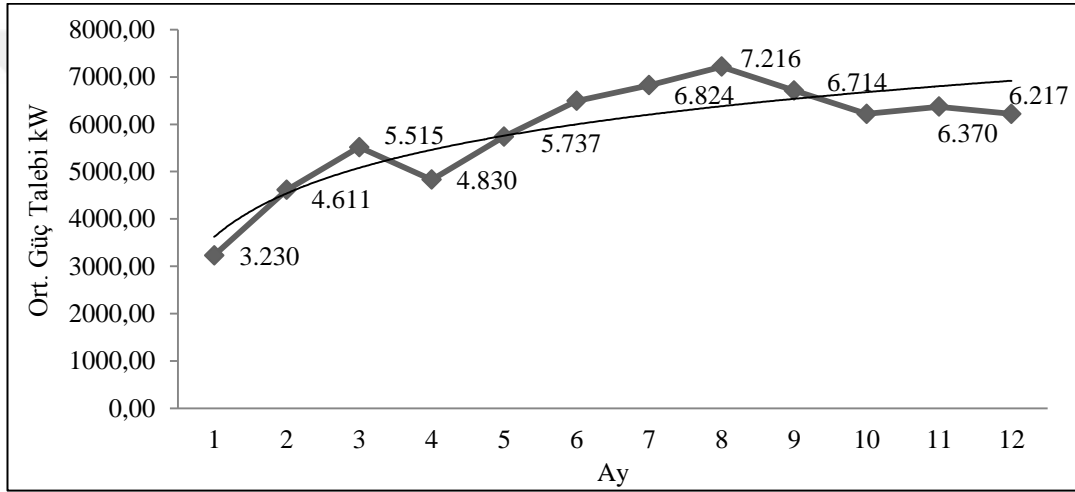
Tablo 3.1. 2014 yılı aylık elektrik tüketimleri

Elektrik	Aralık	Ocak	Şubat	Toplam
T ₁ (Gündüz)	2.155.311	1.115.558	1.418.863	4.689.732
T ₂ (Puant)	955.150	468.850	634.752	2.058.752
T ₃ (Gece)	1.524.238	754.966	1.011.625	3.290.829
Elektrik Tüketimi (kWh)	4.634.699	2.339.374	3.065.240	10.039.313
Elektrik	Mart	Nisan	Mayıs	Toplam
T ₁ (Gündüz)	1.851.917	1.615.641	2.086.524	5.554.082
T ₂ (Puant)	859.471	739.937	965.702	2.565.110
T ₃ (Gece)	1.341.625	1.121.411	1.438.831	3.901.867
Elektrik Tüketimi (kWh)	4.053.013	3.476.989	4.491.057	12.021.059
Elektrik	Haziran	Temmuz	Ağustos	Toplam
T ₁ (Gündüz)	2.233.072	2.339.461	2.427.185	6.999.718
T ₂ (Puant)	1.025.619	1.089.568	1.115.902	3.231.089
T ₃ (Gece)	1.540.701	1.597.827	1.674.411	4.812.939
Elektrik Tüketimi (kWh)	4.799.392	5.026.856	5.217.498	15.043.746
Elektrik	Eylül	Ekim	Kasım	Toplam
T ₁ (Gündüz)	2.241.302	2.144.761	2.088.423	6.474.486
T ₂ (Puant)	1.045.651	953.607	956.539	2.955.797
T ₃ (Gece)	1.563.553	1.504.641	1.478.372	4.546.566
Elektrik Tüketimi (kWh)	4.850.506	4.603.009	4.523.334	13.976.849
Genel Toplam (kWh)				51.080.967

Tablo 3.1’de aylık bazda ve üç tüketim zamanı tarifesıyla toplam elektrik enerjisi tüketimleri kWh olarak 2014 yılı için verilmiştir. Söz konusu verilere bakıldığında toplamda 51.080.967 kWh’lik elektrik enerjisi tüketilmiştir. Bu değerden hareketle ortalama olarak elektriksel yük talebi Denklem (5.1) ile hesaplanmıştır.

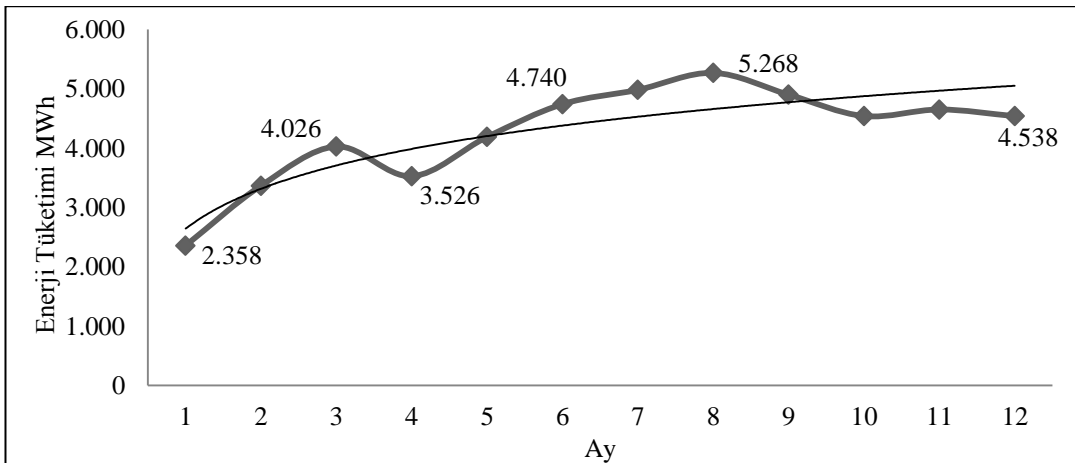
$$\text{Ortalama elektriksel yük talebi} = 51.080.967 / 8.760 = 5.831,16 \text{ kW} \quad (5.1)$$

2014 yılı ortalaması alındığında yaklaşık 5.831 kW’lık bir güç talebi gerçekleşmiştir. Bu değer tek başına sistem kapasitesinin seçimi için yeterli olmayıp, son yılda dair hem elektrik hem de diğer tüketim profillerinin incelenmesi gerekmektedir.



Şekil 3.1. 2014 yılı aylık ortalama güç talebi

Şekil 3.1’de 2014 yılına ait tüketim profili görülmektedir. Burada elde edilen ortalama değerler son yıla ait veriler ile de karşılaştırılarak kıyaslama yapılacaktır.



Şekil 3.2. 2014 yılı aylık elektrik enerjisi tüketimi

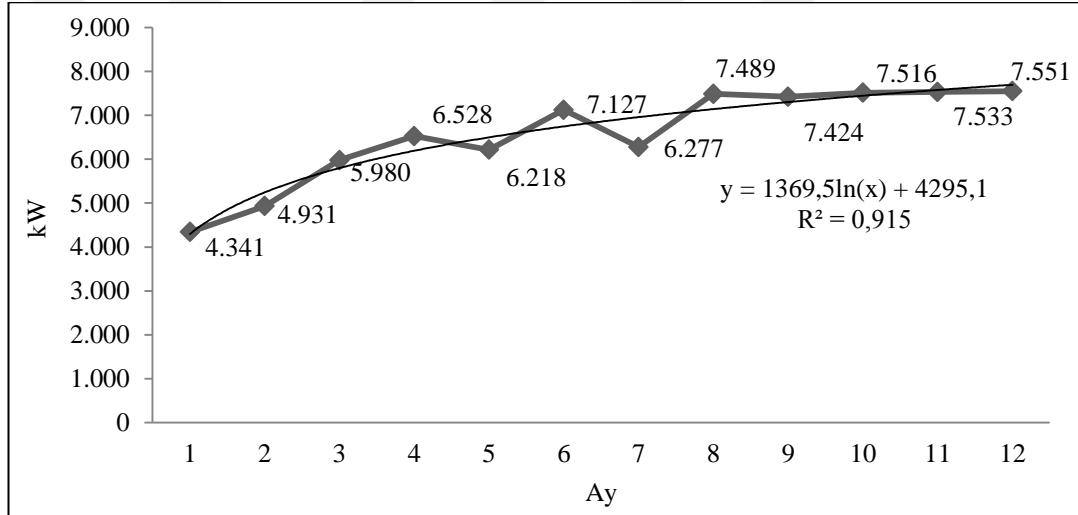
2014 yılında tesislerde meydana gelen aylık enerji tüketimi Şekil 3.2’de verilmektedir. Enerji tüketimine bakıldığında, güç talebi ile enerji tüketimi beklenildiği şekilde paralellik göstermektedir. Grafiklerde görülen veriler, tesis bünyesindeki enerji analizörlerinden elde edilmiştir. Analizörlerden elde edilen veriler ile tesisin fatura bilgileri arasında uyum görülmektedir.

Tesisin 2014 yılı ile birlikte 2015 yılına ait tüketim dataları da ayrıntılı olarak incelenmiştir. Hem fatura bilgileri hem de enerji analizörü kayıtlarına bakılarak bu yıla ait veriler de incelenmiştir. Tesiste ilk göze çarpan noktalar ve firmadan gelen taleplerin başında buldukları bölge içerisinde sıklıkla elektrik kesintisi yaşadıklarını veya buldukları bölge enerjinin yoğun tüketildiği alanda bulunması nedeniyle yakınlardaki yük alma ve atma hadiseleri firmada bulunan bilhassa elektronik cihazların hata mesajları vermesine neden olmaktadır.

Tablo 3.2. 2015 yılı aylık ortalama güç talepleri

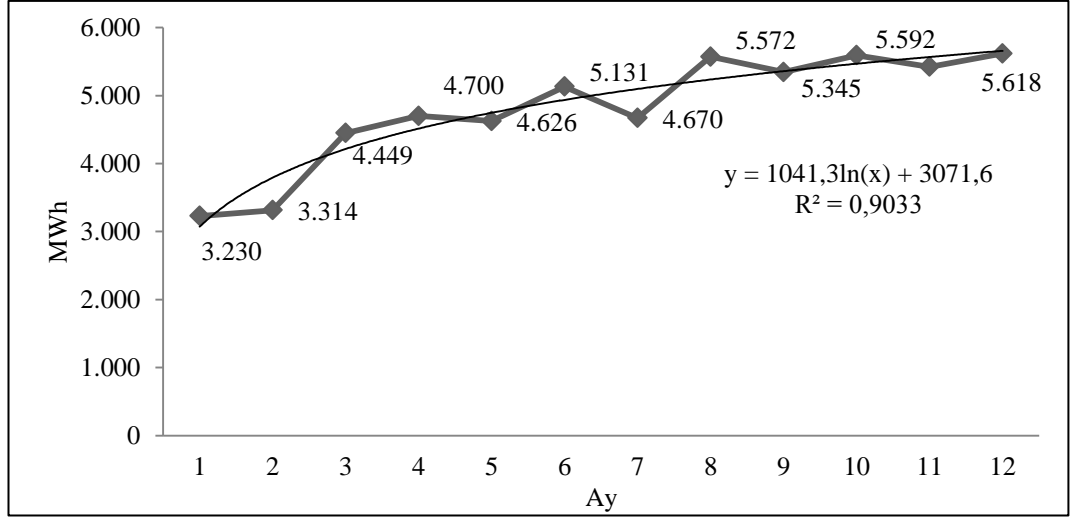
Aylık Elektrik Yük Talebi (kW)	Aralık	Ocak	Şubat
Gündüz	7.694	4.250	4.882
Puant	7.742	4.263	4.751
Gece	7.345	4.152	4.735
Ortalama	7.588	4.221	4.805
Aylık Elektrik Yük Talebi (kW)	Mart	Nisan	Mayıs
Gündüz	5.942	6.610	6.312
Puant	6.079	6.862	6.716
Gece	5.767	6.301	5.868
Ortalama	5.912	6.560	6.248
Aylık Elektrik Yük Talebi (kW)	Haziran	Temmuz	Ağustos
Gündüz	7.205	6.430	7.596
Puant	7.584	6.671	7.862
Gece	6.837	5.911	7.218
Ortalama	7.162	6.308	7.526
Aylık Elektrik Yük Talebi (kW)	Eylül	Ekim	Kasım
Gündüz	7.523	7.591	7.702
Puant	7.808	7.941	7.797
Gece	7.159	7.259	7.246
Ortalama	7.460	7.553	7.570
Yıllık Ortalama Talep (kW)			6.576

Tablo 3.2 verileri incelendiğinde, nisan ayı ile birlikte tüketim değerlerinde ciddi yükselmeler meydana gelerek en yüksek talep ise ağustos ve ekim aylarında puant vakitlerinde gerçekleşmiştir. Kesinti anlarında firmada bulunan stand by tipte dizel jeneratörler ile kalkınmayı sağladıklarını ancak firmanın büyüme projeksiyonu sebebiyle dizel gruplarının da yükü uzun süre karşılayamadığı belirtilmektedir. Firma talepleri doğrultusunda tesiste ada modu çalışma sağlanacak puant anlarda dizeller ile trijenerasyon sisteminin güç ünitesi senkron çalışacaktır. Yük atma ve yük alma senaryosu konusunda hassasiyet gösterilmesi firma taleplerinin başında gelmektedir. Bu sebeple güç ünitesinden yük alma ve atma kabiliyetinde ISO 8525-5 Class 1 standardını sağlaması talep edilmiştir. 2015 yılı için şebeke güç talepleri ise aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.3. 2015 yılı aylık ortalama güç talebi

Ortalama güç talebi ile çizilen Şekil 3.3'te yıl boyunca gerçekleşen profil görülmektedir. Grafikte yılın son aylarında 7,5 MW mertebesinde bir ortalama değer görülmüştür. Bir önceki yıla kıyasla bakıldığında ise ortalama yük talebi, 5.831 kW değerinden 6.576 kW değerine yükselmiştir. Bu yükselmenin temel sebebi tesisin 7/24 esasına göre üretime geçmesi sebebiyledir. Önceki yıla nazaran gece vakitlerinde de vardiyalı ekipler bulunarak baz yükün üzerine üretim de tam kapasite devam ettirilmektedir. Regresyon eğrisi üzerinden bakılacak olursa, R^2 değeri 1'e yakın bir değer olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 3.4. 2015 yılı aylık elektrik tüketimi

Şekil 3.4'te 2015 yılına dair enerji tüketim değerleri görülmektedir. İncelemelerin yapıldığı tesiste 2014 yılı ile 2015 yılları arasında yük talebinin ortalamasında artış gözlenmiştir. Firmanın kapasite artırım girişimlerinin ve büyüme isteğinin sonucu olarak tüketim değerlerinde yükselme meydana gelmiştir. Bu durumda 2015 yılına dair verilerin detaylı incelenmesi ve buna göre boyutlandırma yapılmasına gerek duyulmaktadır. Şekil 3.3'e göre regresyon eğrisinin R terimindeki değerden hareketle 4.295 kW değerinde baz yük oluşmuştur. İki yıl ortalaması olarak bu değer 3.957 kW'tır.

2015 yılı ortalama değerleri açısından bakıldığında, 6.576 kW değerinde ortalama yük talebi söz konusudur. Bir önceki yıla oranla bu değer yaklaşık 745 kW daha yüksek gerçekleşmiştir. Söz konusu tesisin 2015 yılı için, 57.605.760 kWh yıllık toplam elektrik tüketimi gerçekleşmiştir. 2015 yılı itibariyle vardiya sistemi ile çalışmaya başlaması nedeniyle gece saatlerinde de tüketim değerlerinin ortalamaları yüksek olarak gerçekleşmiştir.

3.2. Isı Tüketim Profili

Firmada bulunan mevcut kazan tesislerinde ısı tüketimi için, restoranlar ve yemekhane, çeşitli yakma alanları ve kazan dairesindeki buhar tüketim değerleri göz önüne alınmış, fatura toplamı ile buhar üretim sayaçlarının topladığı değerler göz önünde bulundurularak aşağıdaki tablolar elde edilmiştir. Tablo değerlerinde yalnızca kazan dairesine ait değerler göz önünde bulundurulmuş ve mevcut kazan

dairesinde üretilen buharın sayaçlardan alınan değerleri ile tüketilen doğalgazın alt ısıl değeri olarak 8.500 kcal/m³ değeri referans alınmıştır. Proses ihtiyacı olarak, üretilen buharın niteliği itibariyle 6 barda doymuş buhar tüketimi olup bu buharın üretimi için mevcut kazanlarda 2014 yılında yaklaşık toplam 2.175.000 m³ doğalgaz tüketimi gerçekleşmiştir.

Buradan hareketle 2014 yılı için ısı enerjisi;

$$2.275.000 \text{ (m}^3\text{)} \times 8.500 \text{ (kcal/Sm}^3\text{)} \times 4,184 \text{ (kJ/kcal)} = 8.090 \times 10^{10} \text{ (kj)} \quad (5.2)$$

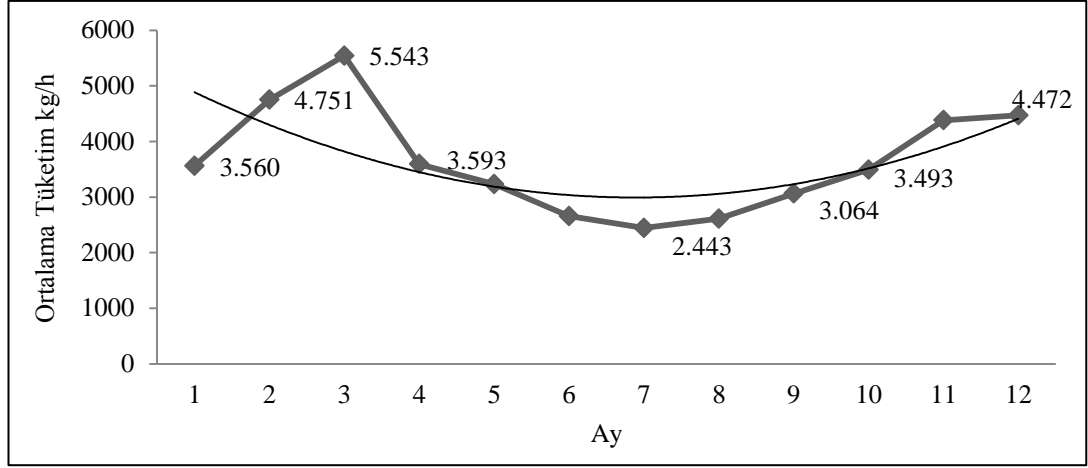
$$8.090 \times 10^{10} \text{ (kj)} \times \frac{1 \text{ kWh}}{3600 \text{ kj}} = 22.474.472 \text{ kWh} \quad (5.3)$$

toplam enerji tüketimi kWh olarak gerçekleşmiştir. Denklem (5.2) ve (5.3)'te yapılan hesaplama ile firma bilgilerinden elde edilen değerler karşılaştırılacaktır. Isı tüketim profili aynı prensiple aylık bazda aşağıda verildiği gibidir.

Tablo 3.3. 2014 yılı aylık ısı tüketim değerleri

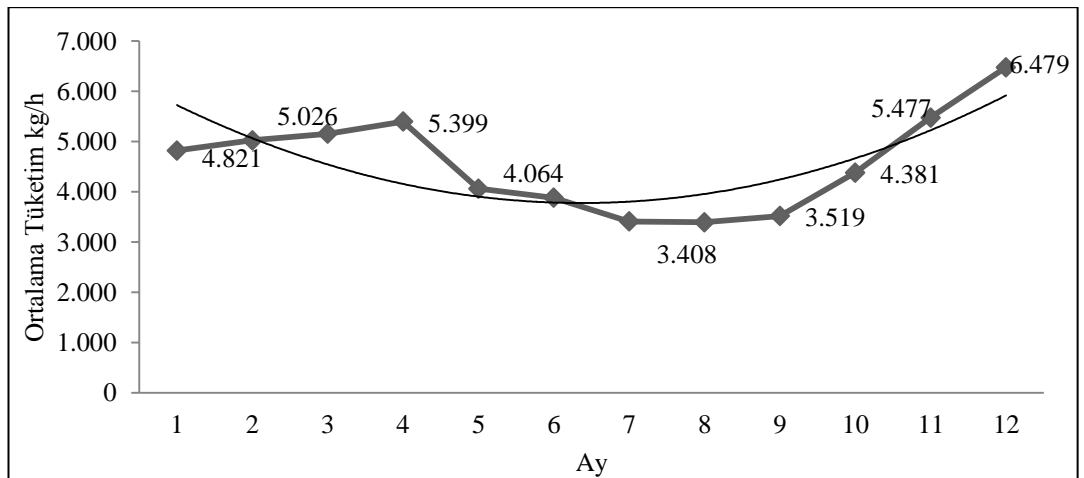
ISI	Aralık	Ocak	Şubat	Toplam
T ₁ (Gündüz)	1.071.728	872.658	1.147.090	3.091.476
T ₂ (Puant)	450.635	353.375	468.909	1.272.918
T ₃ (Gece)	753.109	585.212	801.637	2.139.958
Isı Tüketimi (kWh)	2.275.472	1.811.244	2.417.636	6.504.352
ISI	Mart	Nisan	Mayıs	Toplam
T ₁ (Gündüz)	1.318.359	852.139	772.464	2.942.962
T ₂ (Puant)	576.711	375.285	321.978	1.273.975
T ₃ (Gece)	925.314	600.768	549.991	2.076.073
Isı Tüketimi (kWh)	2.820.383	1.828.192	1.644.434	6.293.009
ISI	Haziran	Temmuz	Ağustos	Toplam
T ₁ (Gündüz)	645.852	570.260	650.480	1.866.591
T ₂ (Puant)	253.078	255.668	292.550	801.296
T ₃ (Gece)	445.399	411.707	431.344	1.288.450
Isı Tüketimi (kWh)	1.344.330	1.237.634	1.374.373	3.956.337
ISI	Eylül	Ekim	Kasım	Toplam
T ₁ (Gündüz)	730.855	958.386	1.058.311	2.747.552
T ₂ (Puant)	306.766	346.220	557.929	1.210.916
T ₃ (Gece)	521.627	640.388	776.386	1.938.401
Isı Tüketimi (kWh)	1.559.248	1.944.994	2.392.626	5.896.869
Genel Toplam (kWh)				22.650.568

Aylık bazda profil değeri ile ortalama doğalgaz tüketim verisi arasında uyum söz konusudur. Ancak doğalgazın alt ısıl değeri değil, fiili ortalama ısıl değeri gerçek kWh tüketim değerini sunacaktır.



Şekil 3.5. 2014 yılı aylık ortalama buhar tüketimi profili

Şekil 3.5'te aylık bazda ortalama buhar tüketimi görülmektedir. Tesis bünyesinde bulunan ve sürekli işletme şartlarındaki kompresörlerin atık ısılarının söz konusu firmanın ofislerinin ısıtılması için ısı geri kazanımı potansiyeli hakkında çalışma yapılarak üretim tesislerinin atık ısıları tespit edilmiştir. Kompresörlerin toplam gücü ve geri kazanılabilecek ısı miktarı uygulama çalışması ile ortaya çıkarılmıştır. Kompresörlerin ceketlerinden alınan ısı ile iç ortam mahal ısıtmaları karşılanmakta olup trijenerasyon sisteminden elde edilecek sıcak su çoğunlukla proses için kullanılacaktır. Grafik incelendiğinde, ortalama buhar talebi 3.650 kg/h olarak gerçekleşmiştir. Ancak kazan suyu geri besleme oranı %45 civarında olup yılda 32 bin ton buhar tüketimi gerçekleşmiştir. Bu değerler buhar kazanları dairesinin değerleridir. Firma bünyesindeki diğer üretim ve tüketim tesislerine dair ısı yükleri hesaplama dahil edilmemiştir.



Şekil 3.6. 2015 yılı aylık ortalama buhar tüketimi

Şekil 3.6'dan hareketle, aylık ortalama buhar tüketimi değerleri, tesiste üretim yapan sistemin verimi hesaplanarak yapılmıştır. Yaklaşım olarak kazan dairesinde tüketilen doğalgaza göre sayaçlardan okunan buhar üretim değerleri ile kazanın verimi yaklaşık olarak %85 olarak hesaplanmıştır. Sayaç değerlerinden üretilen buhar miktarları grafiklerde verilmiştir.

Yukarıda 2015 yılına ait tüketim profili sunulmuştur. Tüketim verileri incelendiğinde ise 4.583 kg/h buhar tüketimi gerçekleşmiştir. Bu yıla dair buhar üretimi ise 40.147.080 kg/yıl olarak gerçekleşmiştir. Bu veriler ile önceki yıla ait değerler karşılaştırıldığında buhar tüketiminde değişim meydana gelmiştir.

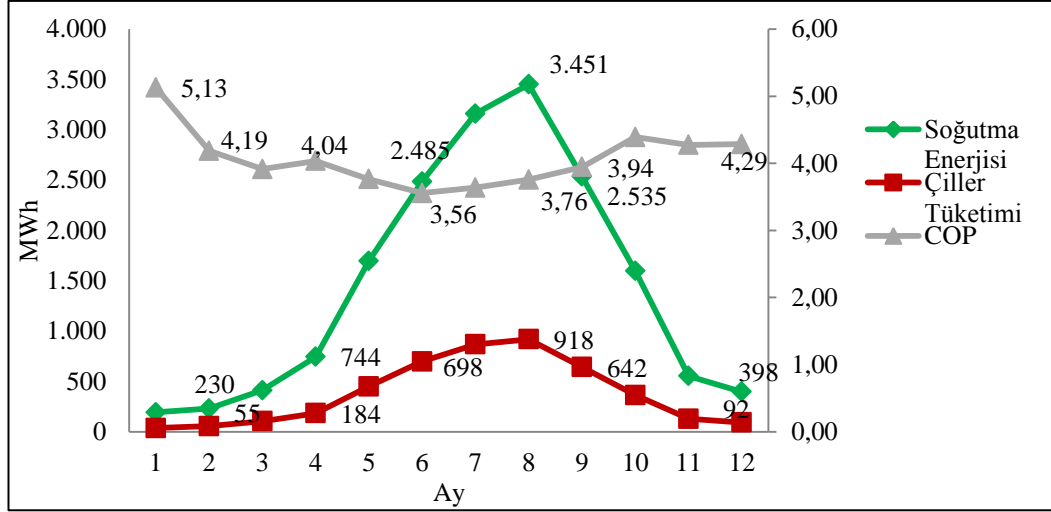
3.3. Soğutma Tüketim Profili

Mevcut durumda 2014 yılına dair analizler yapılmıştır. Soğutma enerjisi tüketimi profili ise aşağıdaki gibi gerçekleşmiştir.

Tablo 3.4. 2014 yılı aylık soğutma enerjisi tüketimleri

SOĞUTMA	Aralık	Ocak	Şubat	Toplam
T ₁ (Gündüz)	210.349	34.298	75.508	320.155
T ₂ (Puant)	96.975	17.855	36.562	151.393
T ₃ (Gece)	107.419	28.506	57.642	193.567
Soğutma Tüketimi (kWh)	414.742	80.660	169.712	665.114
SOĞUTMA	Mart	Nisan	Mayıs	Toplam
T ₁ (Gündüz)	202.160	420.015	955.129	1.577.303
T ₂ (Puant)	89.897	190.635	552.633	833.166
T ₃ (Gece)	145.472	307.013	469.526	922.011
Soğutma Tüketimi (kWh)	437.529	917.663	1.977.288	3.332.480
SOĞUTMA	Haziran	Temmuz	Ağustos	Toplam
T ₁ (Gündüz)	1.205.458	1.497.386	1.471.395	4.174.240
T ₂ (Puant)	642.745	779.247	734.549	2.156.541
T ₃ (Gece)	696.174	938.995	929.700	2.564.870
Soğutma Tüketimi (kWh)	2.544.378	3.215.629	3.135.644	8.895.651
SOĞUTMA	Eylül	Ekim	Kasım	Toplam
T ₁ (Gündüz)	1.170.696	721.239	283.952	2.175.887
T ₂ (Puant)	626.087	392.768	132.619	1.151.474
T ₃ (Gece)	741.948	393.082	98.440	1.233.470
Soğutma Tüketimi (kWh)	2.538.732	1.507.088	515.010	4.560.831
Genel Toplam (kWh)				17.454.076

Tablo 3.4'ten hareketle, maksimum ve minimum soğutma tüketim değerleri bulunan sistemin elektrik tüketimi grafikleri düzeltilmiş ortalama ile aşağıda verilmiştir. Firmanın soğutma ihtiyacı profili değişkenlik göstermekte olup, beklendiği üzere kış aylarında talep düşmüş, yaz aylarında ise talep yükselmiştir.

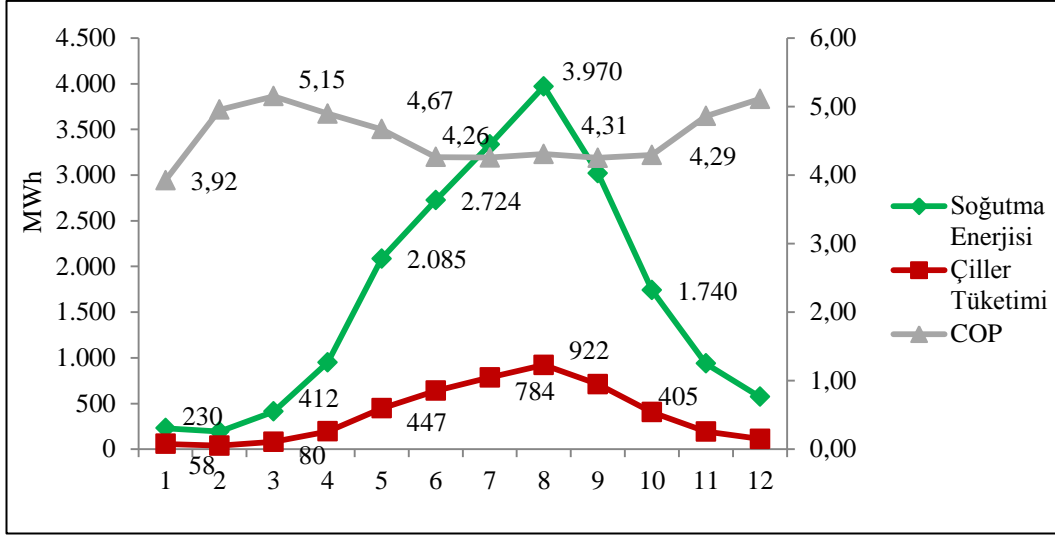


Şekil 3.7. 2014 yılı soğutma enerjisi, çiller tüketimi ve COP değeri

Şekil 3.7’de, mekanik buhar sıkıştırımlı çiller sisteminin elektrik tüketimi, üretilen soğutma enerjisi ve performans katsayısı verilmiştir. Çiller sistemlerinin performans katsayıları çevre sıcaklıklarına bağlı olup değişkenlik göstermektedir. Soğutma tesir katsayısı birim iş girdisi başına yapılan soğutma miktarı olarak tanımlanabilir.

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_g} \quad (5.4)$$

Denklem (5.4)’te verilen Q_L üretilen soğutma, W_g birim iş tüketimi olup bu değerlerin oranı ise soğutma performansını ifade eder. Soğutma sistemlerine ait veri grafikleri incelendiğinde söz konusu sistem için, gerçekleşen tüketim değerleri görülmektedir. Burada çiller soğutma sistemi çalışma prensibi olarak iç ortamdaki ısıyı aracı akışkana buharlaştırıcı ile aktararak mekanik olarak sıkıştırma işlemi yapar ve sıcaklığı yükselen akışkanı yoğunlaştırıcıda çevre atmosfer havasına atar. Isı alış verişini yaparak klima sistemine ve iç ihtiyaç tesislerine soğutma sağlar. Bir yıllık enerji üretim ve tüketim değerleri incelendiğinde, sistemin etkinlik katsayısı ortalama 4 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.8. 2015 yılı soğutma enerjisi, çiller tüketimi ve COP değeri

Şekil 3.8’de, mekanik buhar sıkıştırımlı çiller sisteminin elektrik tüketimi, üretilen soğutma enerjisi ve performans katsayısı verilmiştir. Çiller sistemlerinin performans katsayıları çevre sıcaklıklarına bağlı olup değişkenlik gösterdiği bilinmekte ve bu değer yılın soğuk olduğu zamanlarda daha yüksek seyrettiği görülmektedir. Ocak ayı içerisinde etkinliğin düşmesi ise çiller gruplarının çok fazla kısmi yük altında çalışması nedeniyle olduğu söylenebilir. Soğutma tesir katsayısı birim iş girdisi başına yapılan soğutma miktarını olarak bilinmekte olup COP değeri yıllık ortalamada 4,5 olarak karşımıza çıkmaktadır. Etkinlik katsayısı çiller sistemleri için çalışma şartlarına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği ve bu yıldaki artışın nedeni çillerin tam gün çalışma esasına geçilmesi sebebiyle soğutma, nem alma ihtiyacı bulunan prosesin gece saatlerinde de çalışarak günün sıcak anlarında düşen etkinliğinin yükselmesidir. Ayrıca yeni bakımdan geçirilen sistemin performans artışına neden olduğu da düşünülmektedir.

2014 yılında aylık ortalama 1.454 MWh soğutma enerjisi talebi gerçekleşirken, 2015 yılında ise 1.708 MWh olmuştur. Saatlik bazda 2014 yılı için bu değer 2.019 kW soğutma yükü olurken, 2015 yılında ise 2.340 kW olarak karşımıza çıkmaktadır. Her iki yıl arasında yüksek bir fark görülmezken, firma verilerine göre son üç yıla ait performans katsayısı ortalama 4’tür. Bu durumda çiller sisteminin ortalama anlık yük talebi 2014 yılında 504 kW takip eden yılda ise 520 kW’tır. Çiller elektrik tüketim değerleri ise, her iki yılda birbirine yakın olup yaklaşık 4.555.200 kWh olarak gerçekleşmiştir.

4. TRİJENERASYON SİSTEMİNİN SEÇİMİ VE BOYUTLANDIRMASI

4.1. Güç Ünitesi Seçimi ve Sistem Tasarımı

Öncelikle güç ünitesi seçimi için buhar türbinli trijenerasyon sistemleri düşünüldüğünde, ısı yoğunluklu üretim gerçekleştirmeleri ve elektriksel verimlerinin düşük olması nedeniyle, yaz aylarında soğutma yükü yüksek olan ve yüksek güçte iklimlendirme sistemine ihtiyaç duyulan yerlerde kullanımları makul olmayacaktır. Ancak trijenerasyon uygulamalarında, absorpsiyon çiller kullanımı nedeniyle, tasarlanacak sistemin buhar veya sıcak su tüketiminden geriye kalan ısı yükün mevcut soğurmalı çiller teknolojilerinin performansları ile absorpsiyonlu çiller gruplarının maliyetleri de göz önünde bulundurularak hesaplamalar yapılmalıdır.

Söz konusu tesisin tüketim değerleri incelendiğinde, ayrıca firmadan alınan görüşler neticesinde sistemin uygulanması için tercih edilecek elektrik üretim modeli sürekli üretim olup elektrik kesintisine izin vermeden tesisin 7/24 esasına uygun olmalıdır. Ayrıca, ülkemizdeki bu türden sistemlerin kurulumu için mevzuatların belirsizliği ile lisanslı üretim sisteminin yasal izinlerinin tamamlanarak devreye alınma sürelerinin lisanssız sistemlere göre uzun olması sebebiyle lisanssız üretim seçeneği ağırlık kazanmaktadır. Lisanssız üretim tercihinde şebekeye elektrik satışı söz konusu olmayacaktır ancak yükün puant anlarında ihtiyaç duyulan enerji şebekeden alınacak olup fiderler üzerinden çift yönlü sayaçlar bulunacak ve mevcut tesis için elektrik talebi üst düzeyde karşılanacaktır. Sistemin şebeke, tercih edilen güç ünitesi ve stand by yük ünitesi olarak dizel jeneratörler ile senkron olması istenmektedir.

Bu sebeple yük atma ve yük atma senaryoları üzerinden firmalar ile fikir alışverişleri yapılmıştır. Bağlantı görüşleri alınmış ve mevcut tesisteki haberleşme altyapısı dahil orta gerilim hücre (OG) gözlerin değişimine de ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir. Tesiste bulunan kritik yükler için firma görüşleri alınarak, dizel jeneratörler ile paralel olması istenen trijenerasyon sisteminin güç üniteleri bu yüklere göre değerlendirilmiştir.

Trijenerasyon sistemlerinde kullanılacak olan güç ünitesi seçiminde genel kabul olarak motor veya türbin seçimi kararı verilirken maliyetlerin düşünülmesi gerektiği gibi elektrik ve ısı enerjisi ihtiyaçlarının oranı da göz önünde bulundurulması gerektiği vurgulanmıştır. Genel bir yaklaşım olarak Elektrik/Isı oranı >1 ise motor seçilirken, Elektrik/Isı oranı $<0,8$ olduğunda ise türbin seçimi yapılması öngörülmüştür. Elektrik/Isı oranı $0,8 < E/I < 1$ ise kritik durum olarak değerlendirilip ayrıntılı hesaplamalar sonucunda seçim yapılması önerilmektedir [10]. Kurulacak sistem için literatürde güç ünitesi kapasiteleri, yakıt tüketimleri, yol verme süreleri, yakıt tipi, kurulum ve işletme maliyetleri, verim değerleri, kısmi yük performansları, emisyon değerleri ve kullanım ömürleri gibi birçok parametre düşünülmesi gerekmektedir.

Tesiste kullanılan enerji tüketim değerleri incelenmiş olup, güç ısı oranları son iki yıl için şu şekilde hesaplanmıştır.

$$EIO = \frac{W}{Q} \quad (4.1)$$

$$EIO = \frac{51.080.967 \text{ kWh}}{21.813.458 \text{ kWh} + 17.454.076 \text{ kWh}} = 1,30 \quad (4.2)$$

$$EIO = \frac{57.605.760 \text{ kWh}}{28.908.806 \text{ kWh} + 20.498.400 \text{ kWh}} = 1,16 \quad (4.3)$$

Denklem (4.1)'den hareketle yapılan işlemler incelendiğinde, 2014 yılı için oran 1,30 olarak gerçekleşirken, 2015 yılında ise güç ısı oranı 1,16 olarak gerçekleşmiştir. Bu değerler elde edilirken soğutma enerjisi tüketimi de hesaba dahil edilmiştir. Kojenerasyon hesabında toplam elektriğin toplam ısıya oranı hesaplanırken trijenerasyon sistemi için eşdeğer absorpsiyon çillerin aynı soğutma enerjisini üretmek için ihtiyaç duyacağı ısı ile yaklaşımı yinelemek oranı derinlemesine inceleme imkanı sunacaktır. Bu halde, yapılan piyasa araştırmasında tek etkili çiller grupları için etkinlik katsayısı 0,6-0,8 aralığında olup çillerin jeneratöründe giren ve çıkan akımın sıcaklığı ile orantılıdır. Çift etkili çiller sistemlerinde ise bu değer 0,8-1,2 değerleri arasında bulunmaktadır. Yapılan öngörüler neticesinde, tek veya çift etkili çiller kullanılacağı daha yüksek etkiye sahip sistemlerin hem maliyeti hem de sektörel yaygınlığının bulunmaması nedeniyle düşünülmemektedir.

Ayrıca absorpsiyonlu çiller sistemlerinin etkinliğinin düşük olması ve yeni nesil buhar sıkıştırılmalı çiller gruplarının tesir katsayılarının yüksek oluşu bu ekipmanların kullanımını ekonomik özelliklerini kaybettirmesi nedeniyle sınırlamaktadır. Elektrik ısı oranını etkinlik değeri ortalama 0,8 olan bir çillere göre tekrarlamak gerekirse,

$$EIO = \frac{57.605.760 \text{ kWh}}{28.908.806 \text{ kWh} + 25.623.000 \text{ kWh}} = 1,056 \quad (4.4)$$

Denklem (4.4)'e göre son yıla dair oran 1,056 olmuştur. Yeni oran 1,056 olmuş ve yine elektrik talebi ısı talebinden yüksek olarak karşımıza çıkmıştır. Burada yapılan analiz bizi motor seçimine yönlendirmekte olup piyasa araştırması tesis tüketim verileri ışığında yapılmıştır.

Ayrıca tercih edilecek gaz motorlarında yük alma ve atma kabiliyetinde ISO 8525-5 Class 1'e göre yük alma ve yük atma standartları aranmıştır. Firmalardan talep edilen grafikler ile bu standardı sağladığı teyit edilerek motor tercihinde bulunulmuştur. Trijenerasyon ünitelerinin (genset) yük alma ve yük atma kabiliyetleri ISO (8525-5:2005, Class 1) standardına göre, tabloda verilen değerler baz alınarak değerlendirme yapılmıştır.

Tablo 4.1. Yük alma ve yük atma yeteneği değerleri

Yük Alma Yeteneği		Yük Atma Yeteneği	
Yüksüz Halde	% 10	Tam Yükte	% 30
%25 yükte	% 5	%75 yükte	% 20
%50 ve üzeri yükte	% 10	%50 yükte	% 10

Tablo 4.1'e göre yük alma ve yük atma kabiliyetlerinin motor yüklenme durumuna göre yüzdesel olarak verildiği görülmektedir. Genset değerlerinin yanında elektrik sisteminin kararlılığını da sürdürmek için dinamik güç kaynağı (DUPS) ile ilgili görüşler alınarak yük atma senaryosunun güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Sistemin toplam elektriksel eşdeğeri DUPS kaynağının maliyeti düşünülen trijenerasyon yatırım miktarının tutarından daha yüksek olacağı görülmüştür.

Tesis bünyesinde bulunan cihazların baz yükü düşünülerek anlık kesintilerde veya motor arıza durumlarında DUPS ile cihazların hata vermesinin engellenmesi ayrıca dizel jeneratörlerinin de senkrona girinceye kadar vakit tanınması için değerlendirilmiştir. Bu senaryoda, motorların birinin arızaya geçtiği ve şebekede elektriğin bulunmadığı varsayılarak yaklaşık 1.150 kW DUPS sistemi için teklifler alınmıştır. Dinamik UPS uygulaması toplam yatırım kalemi içerisinde önemli bir bütçe oluşturması nedeniyle karşılıklı görüşmeler sonucunda listeden çıkartılmıştır.

Motor ve türbin tercihi noktasında ise tasarımda gaz motoru tercih edilme nedenleri arasında tesisin toplam güç talebinin aralığının yanında elektrik ısı oranı sebebiyledir. Buhar türbini uygulamaları genellikle ısı/buhar ihtiyacının yüksek olduğu tesislerde tercih edilmekte olup, gaz türbinli uygulamalar ise toplam verimi artırması açısından kombine çevrim sistemi şeklinde uygulanıp daha yüksek güç aralıklarında tercih edilmektedir. Bu sistem için gaz motorları hem daha kompakt bir tasarım olarak konteynır setli daha küçük alanlarda çalışma imkanı sunmaktadır. Trijenerasyon sistemlerinde bina, inşaat işleri de önemli bir zaman kaybı getirmesinin yanında bina inşaatı ruhsatı, yangın izin, harç, belediye işlemlerinin her biri ek maliyet olarak karşımıza çıkmaktadır.

Trijenerasyon sistemlerinde literatürde yapılan araştırmalar neticesinde, sistem seçimi için birçok karar verme metodu görülmüştür. Algoritmik, termodinamik numerik yaklaşımlar kullanılarak sistem seçimine karar verilmeye ve en verimli tasarım gerçekleştirilmeye çalışılmıştır [53, 54]. Trijenerasyon sistemleri, kojenerasyon sisteminin soğutma grubu eklenmesiyle meydana gelmesinden dolayı, kojenerasyon tebliğinde bahsi geçen birincil enerji tasarrufu hesabı trijenerasyon sistemi için literatürde karşılaşılan soğutma enerjisi eklenmiş şekli ile uygulanmıştır.

Yakıt enerjisi tasarruf oranı (FESR) olarak kısaca tabir edilen metod formülasyon olarak şu şekildedir;

$$FESR = \frac{F_s - F_{CCHP}}{F_s} \quad (4.5)$$

$$FESR = 1 - \frac{E_g}{\frac{H + E_{cw}}{n_k} + \frac{E_e}{n_{güç\ sist.}}} \quad (4.6)$$

Yakıt enerjisi tasarruf oranı tanım olarak, aynı enerji miktarını sağlamak için, ayrıık üretim sistemlerine göre trijenerasyon sistemi ile enerji tasarruf oranıdır. Denlem (4.5) ve (4.6)'da ifade edilen, F_s ayrıık üretim ile kullanılan toplam birincil enerjidir. F_{CCHP} ise, trijenerasyon sisteminde tüketilen toplam birincil enerjidir. İkinci ifadede ise, H tüketime sunulan ısı, E_{cw} soğutulan su enerjisi, n_k kazan verimi, E_e elektrik enerjisi, n_{pp} güç santrali verimi ve E_g yakıtla motora verilen enerjidir. Bu formülasyon ile İtalya'da ulusal bir düzenleme olarak yıllık enerji verimliliği yüksek olan tesisleri finansal olarak desteklenmektedir. FESR değeri en yüksek olan tesisler desteklenmektedir [45, 55, 56].

Enerji kullanım faktörü (EUF) olarak bilinen ifade ise termodinamiğin birinci kanunu genel yaklaşımıyla şu şekilde ifade edilmektedir:

$$EUF = \frac{E_e + H}{E_y} \quad (4.7)$$

Denklem (4.7)'de, E_e tüketime sunulan elektrik, H tüketime sunulan ısı, E_y yakıtla motora verilen enerjidir [57].

Trijenerasyon birincil enerji tasarrufu (TPES) hesabı ise, kojenerasyon sistemlerinde kullanılan hesap metoduna benzer olarak ifadeye soğutma teriminin de eklenmesi ile elde edilir.

$$TPES = 1 - \frac{F_z}{\frac{W_z}{n_{e-sp}} + \frac{Q_z}{n_{t-sp}} + \frac{R_z}{n_{e-sp} \times COP_{sp}}} \times 100 \quad (4.8)$$

Denklem (4.8)'de z trijenerasyon için alt indis olup F yakıtın termal içeriği, sırasıyla W , Q , R değeri trijenerasyon ile üretilen elektrik ısı ve soğutmadır. Referans verim değeri olarak ise n kullanılmıştır. COP ise ayrıık üretim sistemi için etkinlik değeri. Ayrıık üretim için kabul edilecek referans değeri ile bu verimler kullanılacaktır [46, 58].

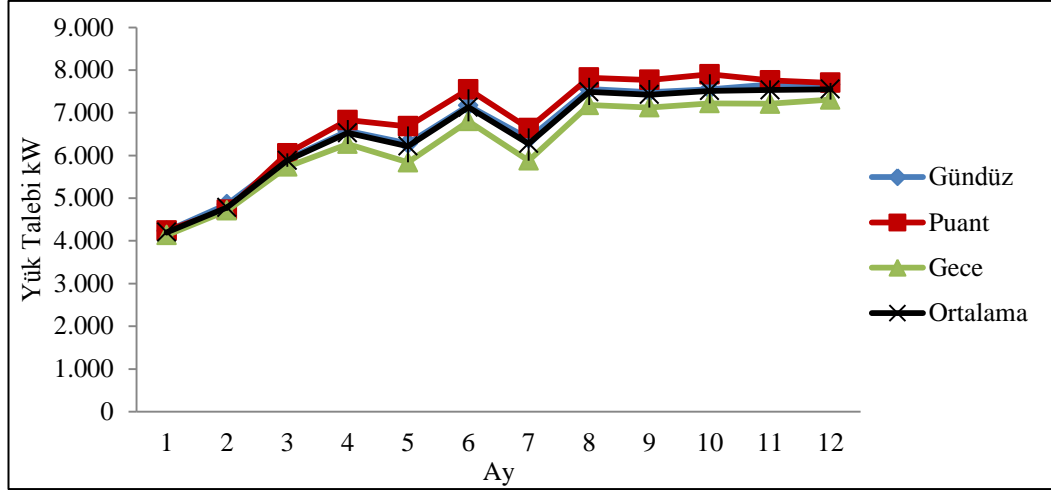
Trijenerasyon sistemlerinde tercih edilen yönetim sistemlerinden olan elektrik yük takibi, termal yük takibi, motor sürekli tam yük modunda veya birincil enerji tasarrufu talebi yönetimi metodları bu türden sistemlerin boyutlandırması aşamasından sonra en önemli tarafını oluşturmaktadır. En yaygın olarak termal talep

yönetimi kullanılmaktadır [45]. Birçok üretim tesisinde üretilen elektrik şebekeye entegre olup mahsuplaşlabilmektedir. Ancak termal olarak üretilen çıktılarının satışı her zaman mümkün olmayıp kar oranı düşük olmaktadır.

Yukarıdaki nedenlerle söz konusu talebin karşılanması maksadıyla termal talebinin takibinin yapılması daha makul olarak gözükmemektedir. Ancak elektriksel yükün tesis tarafından önceliği bulunup, uzun süre kısmi yüklerde çalışılması istenilmemektedir. Burada üretilebilecek buhar ve soğutma enerjileri düşünüldüğünde motorun bu değerlerin tamamını sağlayamayacağı ve meydana gelecek dalgalanma miktarının yüksek olması sebebiyle motorlar elektrik yükünü takip edecektir. Tesisin son yıla dair yıllık enerji tüketimi incelendiğinde ise yaklaşık 57,6 milyon kWh elektrik enerjisine ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu miktarda üretimin yapılabilmesi bir yıl saatine yapılan oranla bulunabilir.

$$\text{Ortalama Talep (kW)} = \frac{57,6 \times 10^6 \text{ kWh}}{8.760 \text{ h}} = 6.576 \text{ kW} \quad (4.9)$$

Piyasada bulunan mevcut motor seçenekleri bu noktada incelenmiştir. Buhar tüketiminin düşük olması ve buna kıyasla elektrik ihtiyacının yüksek olması, ayrıca hızlı kurulum ve devreye alma gibi nedenlerle gaz motoru seçeneğinin güç ünitesi olarak kullanımı uygun görülmüştür. Gaz motorlarının elektrik/ısı oranlarına bakıldığında da bu durum açıkça görülebilmektedir. Denklem (4.9)'a göre yükün ortalama değeri olarak 6,5 MW değeri son yıl verilerine göre gerçekleşmiş olup bu değeri yorumlamak adına çiller tüketimine tekrar bakılması gerekmektedir. Çünkü kurulacak trijenerasyon sisteminde absorpsiyonlu çiller yalnızca çözümlü pompası dışında elektrik tüketmeyecek olup buhar sıkıştırımlı çiller gruplarının elektrik talebini azaltacaktır. Son iki yılın çiller soğutma enerjisi üretimlerini ve çiller gruplarının elektrik tüketimlerini incelediğimizde 504 kW ve 520 kW olarak gerçekleşmiş olup ortalama etkinlik katsayısı 4 alınarak hesaplama yapılmıştır. İlk bakışta absorpsiyonlu çiller sistemlerinin gaz motorları ile üretebildiği soğutma enerjisi incelendiğinde soğutma talebinin bir bölümünü karşılayabilecek olup mekanik çiller gruplarının şebeke üzerindeki yükünü azaltabilecektir. 6,5 MW ortalama değeri bu sebeple azalacak olup soğutmanın tamamının karşılanması durumunda ise 6 MW yük talebi karşımıza çıkacaktır.



Şekil 4.1. Üçlü tüketim saatine göre gaz motoru seçim grafiği

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere, firmanın 2015 yılı süresince gerçekleşen yük talebine göre üçlü tüketim değerleri referans alınarak ortalama talep eğrisi sunulmuştur. Bu değerlerden hareketle $6 \text{ MW} \pm \%10$ toplam güç ünitesi kapasitesi üzerinden araştırmaya gidilmiştir. Talep edilen güç miktarı açısından bakıldığında ise bu güç değerlerinde yüksek verimli gaz motoru seçeneği piyasada oldukça fazladır. Yapılan katalog incelemeleri ve firma görüşleri sonucunda mevcut tesise birkaç senaryo önerisi yapılabilmektedir.

Bunlardan ilki $2 \text{ MW} \times 3$ motor seçeneğidir. Diğeri tek bir 6 MW motor veya $3 \text{ MW} \times 2$ motor seçenekleri olmaktadır. Motor güçleri açısından bu değerlerin üzerinde durulma nedeni ise gaz motoru üreticisi firmalarda 2 MW ve 3 MW seçeneklerinde gaz motoru seçeneğinin yüksek olmasıdır. Ayrıca firmaların yaygın olarak satış yaptıkları ve kendilerine güvendikleri motor seçenekleri üzerinde durulmuştur. Bir motorun firma tarafından arıza/işletme süresi açısından en az değere sahip üniteleri tavsiyeler ile değerlendirmeye alınmıştır. Tek bir motor tercihi $3 \times 2 \text{ MW}$ gibi birden fazla motor seçeneği için fiyat anlamında daha makul olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak tek bir motorun tercih edilmeme nedeni ise herhangi bir arıza durumunda tüm sistemin durdurulmak zorunda olmasıdır. Bu durumda ise trijenerasyon sisteminin faydalı işletme süresi kısalarak birincil enerji tasarrufu sınırlı kalacaktır. Motor seçenekleri arasında küçük güçlerde $1 \text{ MW} \times 6$ motor gibi seçeneklerde mevcuttur. Ancak gaz motoru üreticilerinin motor fiyatları incelendiğinde, 1 MW motor ile 2 MW motor seçeneği arasında fiyatın oransal olmadığı görülmüştür. 1 MW motor fiyatının üzerine bir miktar çıkılması suretiyle 2 MW motor almak mümkündür.

Yukarıda bahsedilen nedenler dışında, gaz motorlarının katalog verileri incelendiğinde ise şu durum göze çarpmaktadır. Yüksek güç değerlerine çıkıldıkça gaz motorlarının verimlerinde artış meydana gelmektedir. Ancak verimin yüksek olması sadece bir değerlendirme ölçütü olmamalıdır. Çünkü her firmanın en çok ürettiği, parça bulundurduğu ve elinin güçlü olduğu motor güçleri farklı olabilmektedir. Bu sebeple firmalar ile bu motor seçenekleri üzerinde fikir alış verişi yapılmıştır.

Yapılan piyasa araştırması neticesinde, General Electric markasına ait iki motor seçeneği üzerinde durulmuştur. Teknik katalogları ISO 3046/1 standartları baz alınarak hazırlanmış kataloglar üzerinden inceleme yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, iki adet motor seçeneğinin yatırım maliyeti ve geri ödeme süresi ile sistemin kararlı çalışması göz önünde bulundurulduğunda asimetrik motor tercihi yapılmıştır. Motor gücü tercihinde her iki yıla ait tüketim grafiğine göre baz yük talepleri dikkate alınmıştır. Son yıla ait baz yük talebi çiller sisteminin absorpsiyonlu grup tarafından soğutmanın bir bölümünün karşılanması sebebiyle elektriksel talebinin bir bölümü devreden çıkarıldığı durum için yaklaşık iki yıl ortalaması 3.722 kW baz yük talebi karşımıza çıkmaktadır. Motor üretici firmaya ait gaz motorları incelendiğinde, 3.342 kW'lık gaz motoru birinci motor seçeneği baz yüke yakın olması nedeniyle, ikinci motor olarak ise yine aynı markaya ait 2.679 kW'lık motor tercih edilmiştir. Birinci motor master motor olarak düşünülmüş ve yıl boyunca tam yükte çalışması için tercih edilmiştir. Tercih edilecek motorlarda klimatolojik veriler göz önünde bulundurularak yükselti dış ortam sıcaklığı ve nem değeri ile motor güç kaybı da önem arz etmektedir. Bu sebeple 1.500 m yükseltiye kadar motor verim değerlerinin sabit tutulabilmesi tasarımın yapıldığı alan ve çalışma şartlarının olumsuz etkilerini en aza indirebilecektir. Motor tercihinde bu türden hususlar da göz önünde bulundurularak tercih yapılmıştır. Kurulacak sistem için, her bir gaz motoruna motor arkası atık ısı kazanı bağlanması öngörülmüştür. Bu sebeple de üçlü motor seçeneğine göre hem motor fiyatı hem de atık ısı kazanı yatırım maliyeti açısından tasarruf sağlanabilecektir.

Üretici katalog değerleri yapılan hesaplamalarda referans alınmıştır. Yapılan ön incelemelerde, motorların katalog verileri ile aşağıdaki tablo oluşturulmuştur.

Tablo 4.2. Gaz motorlarına ait teknik katalog verileri

MOTOR MODELİ	Birim	JMS 616 GS	JMS 620 GS
Motor Gücü	kW	2.745	3.431
Devir Sayısı	min ⁻¹	1.500	1.500
Ortalama Etkin Basınç	bar	22	22
Egzoz Gazı Kütleli Debisi (Islak)	ort. kg/h	14.771	18.545
Yanma Havası Kütleli Debisi	ort. kg/h	14365	18.035
Maksimum Çevre Sıcaklığı	°C	40	40
Tam Yükte Egzoz Sıcaklığı	ort. °C	364	366
MOTOR PARAMETRELERİ			
Silindir Çapı	mm	190	190
Stroke	mm	220	220
Silindir Toplam Hacmi	L	99,8	124,75
Silindir Sayısı		16	20
Ortalama Piston Hızı	m/s	11	11
Yağ Kapasitesi	L	648	765
Sıkıştırma Oranı		12	12
Yağ Tüketimi	g/kWh	0,20	0,20
ELEKTRİKSEL ve TERMAL DEĞERLER			
Etkin Elektriksel Gücü	kW	2.679	3.342
Nominal Hız	rpm	1.500	1.500
Frekans	Hz	50	50
Güç Faktörü cosφ		0,8-0,95	0,8-0,95
Tam Yükte Verim	%	97,6	97,4
Maksimum Ortam Sıcaklığı	°C	40	40
Koruma Sınıfı		F	H
Elektriksel Güç	kW	2.679	3.342
Egzoz Termal Gücü (120 °C)	kW	1.097	1.392
HT Termal Gücü	kW	1.129	1.400
LT Yardımcı Devre Termal Gücü	kW	261	328
Radyasyon Isısı	kW	192	251
Yakıt Tüketimi	kW	5.860	7.357
Gaz Tüketimi	Nm ³ /h	592	743
Elektriksel Verimlilik	%	45,7	45,4
Termal Verimlilik	%	42,4	42,4
Toplam Verimlilik	%	88,2	87,8
SİSTEM PARAMETRELERİ			
HT Ceket Suyu Sıcaklığı	°C	90-70	90-70
HT Ceket Suyu Akış Oranı	m ³ /h	119,7	133,9
Maksimum Egzoz Karşı Basıncı	mbar	50	50

JMS 616 model gaz motoru için, elektriksel verim %45,7, termal verim %42,4 ve toplam verim %88,2'dir. JMS 620 model gaz motoru için, elektriksel verim %45,2, termal verim %42,4 ve toplam verim %87,8'dir. Tercih edilen motor seçenekleri ve çalışma parametreleri incelendiğinde ve tesis ihtiyaçları değerlendirildiğinde 6 bar doymuş buhar sıcaklığı olarak $T_{\text{doy}}=158,83$ °C'dir. Bu sıcaklıkta buhar üretimi için egzoz termal çıkışının kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Trijenerasyon tesislerinde öncelikli üretim olarak buhar ihtiyacının karşılanmasının ardından soğutma ihtiyacı kullanılabilir termal çıktılar ile boyutlandırılmaktadır.

Egzoz termal güçleri her iki motor için toplandığında 2.489 kW termal güç bulunmaktadır. Motor yüküne bağlı olarak yakıt sarfiyatları aşağıda verilmektedir.

Tablo 4.3. Gaz motorları yük durumuna bağlı yakıt tüketimleri

JMS 616							
Yük %	50	60	70	75	80	90	100
Yakıt m ³ /h	297	356	416	445	474	531	592
JMS 620							
Yük %	50	60	70	75	80	90	100
Yakıt m ³ /h	373	447	521	558	593	668	743

4.2. Trijenerasyon Sistemi Enerji Üretimi ve Referans Yıla Dair Analizler

Genel bir yaklaşımla proseste ortalama olarak 4,5 ton buhar ihtiyacı bulunmaktadır. Bu ihtiyacın egzoz termal gücü dikkate alındığında ise bu değerlerin tamamının karşılanamayacağı görülmektedir. Üreticinin tavsiye ettiği atık ısı kazanı ile proseste istenilen buharın birinci motorun tam yükte çalışmasıyla 1.300 kg/h, ikinci motorun tam yükte çalıştığı durumda ise 1.700 kg/h buhar üretebileceği görülmüştür. Söz konusu durumda LT yardımcı devresinin kullanımı sınırlı olup motor parametrelerinde maksimum ikinci devre ara soğutması için 50 °C verisi paylaşılmıştır.

Buhar üretimi egzoz devresinden sağlanacak olup, yüksek sıcaklık devresi olarak ise, ara soğutma birinci devre, motor ceket ve yağlama yağı sıcaklığı (80 °C) devreleri kullanılabilir. Ara soğutma devresi için verilen toplam termal güçten 620 model motor için 890 kW değeri birinci, 202 kW değeri ikincil ara soğutma devresine aittir. 616 model motorda ise 725 kW birinci, 146 kW ise ikinci ara soğutma kademesine aittir.

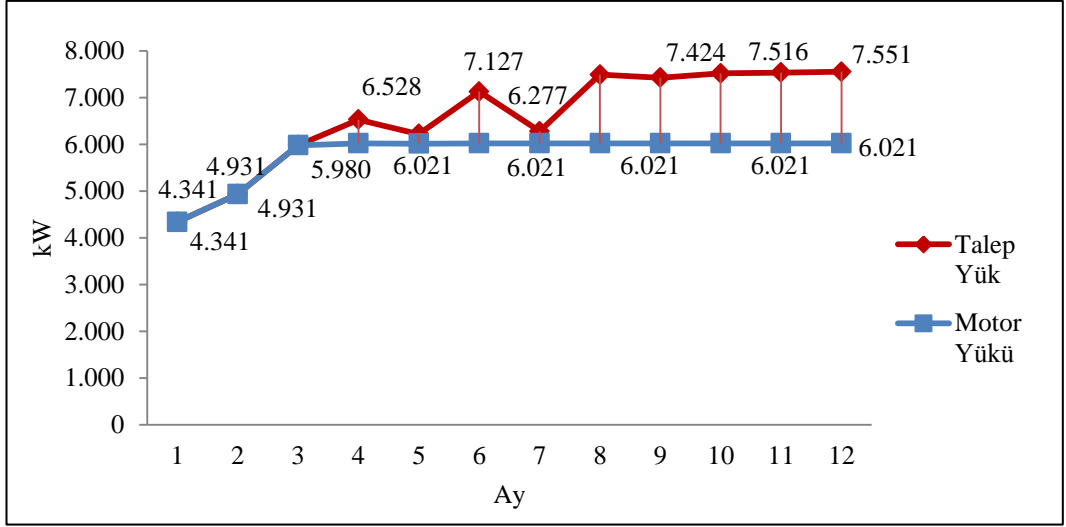
Egzoz termal güçleri için sırasıyla 833 kW ve 1.060 kW değerleri ise egzoz sıcaklığının 180 °C'e soğutulması ile elde edilecek termal kazanımlardır. Egzoz sıcaklığının standartta belirtilen değerden yüksek olarak seçilme sebebi ise üretilecek buharın 6 bar doymuş buhar olması ve sıcaklığının yaklaşık 160 °C olması nedeniyledir.

Bu termal gücün hepsi kazanılabilir olmayacaktır ve genel kabul olarak %10'luk kısmı tersinmezlikler, yüzey izolasyon ile boru kayıpları ile kullanılamayacaktır. Bu hesaplama göre ise buhar için yaklaşık 1,53 kg/kW değeri karşımıza çıkmaktadır.

Gaz motorunun HT devresi aracılığı ile (egzoz hariç) sıcak su üretimi mümkün olacaktır. Tesisin sıcak su ihtiyacı çok fazla bulunmayıp mevcut tesislerinde bulunan ısı geri kazanım sistemleri ile bu ihtiyacın büyük bölümü giderilmektedir. Bu sebeple bu devreye ait termal ısılar ile çiller seçimine geçilmiştir. İki çeşit soğurmalı çiller piyasada bulunmakta olup, bunlardan absorpsiyonlu çiller adsorpsiyonlu çillere göre fiyat ekonomisine sahiptir. Düşen jeneratör sıcaklığına absorpsiyonlu çillerin tepkisi daha yüksek olmasına karşın, tanınmışlığı ve geniş ürün yelpazesi bu sistemi öne çıkaran etmenler arasındadır. HT devresi ile uyumlu çalışabilecek bir çiller seçimi için üreticiler ile görüşülmüş olup, Broad marka çiller grupları için seçim çalışması yürütülmüştür. Bu kapsamda, 1.782 kW (507 RT) soğutma kapasiteli, 7-12 °C sıcaklık aralığında çalışacak bir çiller seçimi yapılmıştır. Çiller sisteminin etkinliği göz önünde bulundurulduğunda 90-80 °C aralığında çalışarak, 0,72 COP değerine ulaşılacağı üreticiden alınan bilgiler ile görülmüştür.

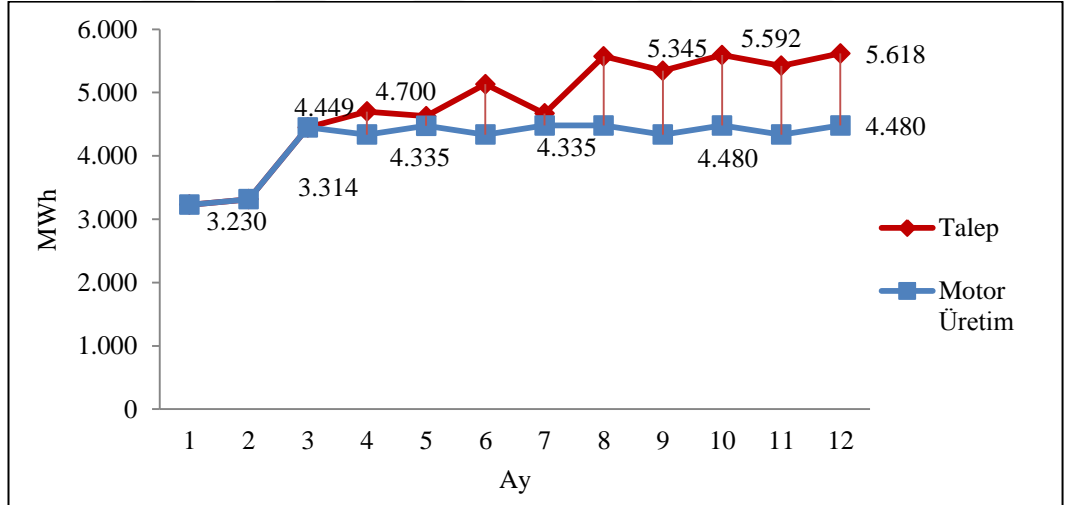
Absorpsiyonlu çiller sistemlerinin soğutma kapasiteleri çalışma sıcaklığının maksimum değeri ile büyük değişkenlik göstermekte ve aynı termal yük karşılığında 95-85 °C çalışması durumunda etkinlik katsayısı 0,80 değerlerine kadar çıkmaktadır. Bu soğutma yüküne ulaşmak içinse 2.475 kW bir termal güce ihtiyaç duyulmaktadır. Çiller sisteminin çözelti pompası ise 17 kW gücünde olup hesaplamalarda bu değer de göz önünde bulundurulmuştur.

Şekil 4.2'de ise gaz motoru ile üretilebilecek olan güç, buhar ve soğutma enerjileri tesis ihtiyaçları ile birlikte grafik üzerinde verilmiştir. Gaz motorunun egzozuna bağlanan atık ısı kazanı ile proseste ihtiyaç duyulan buhar üretimi gerçekleştirilirken, HT devrelerinden alınan sıcak su ile absorpsiyonlu çiller çalıştırılmıştır. Bu sisteme ait üretim grafikleri şu şekildedir.



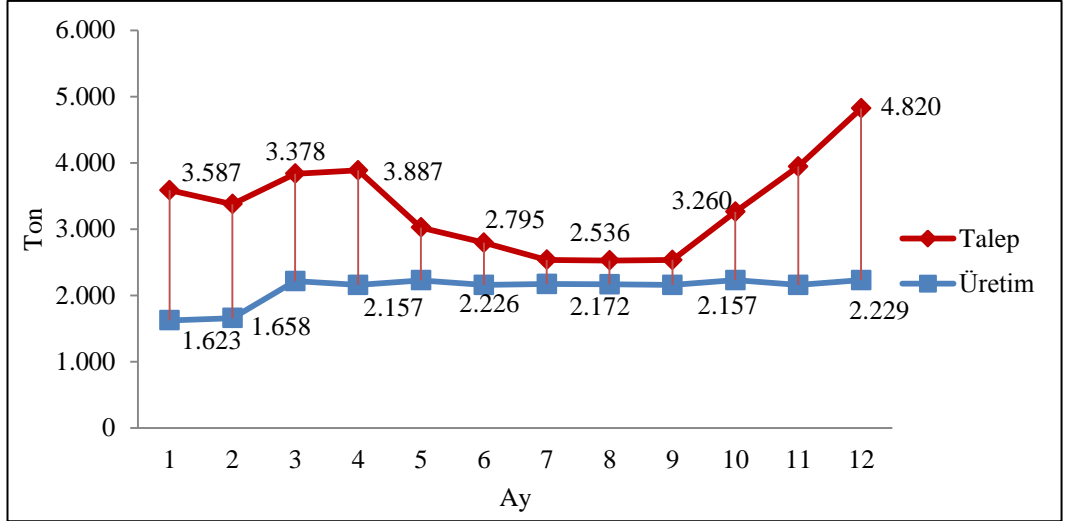
Şekil 4.2. Trijenerasyon sistemi ile elektrik üretimi

Şekil 4.2’de görüldüğü üzere gaz motorları sürekli modda elektrik üretimi gerçekleştirmektedir. 5.786 kW ortalama üretim yapan motorlar % 96 kapasite ile çalışmaktadırlar. Enerjinin ortalama olarak karşılanması ise şu şekildedir.



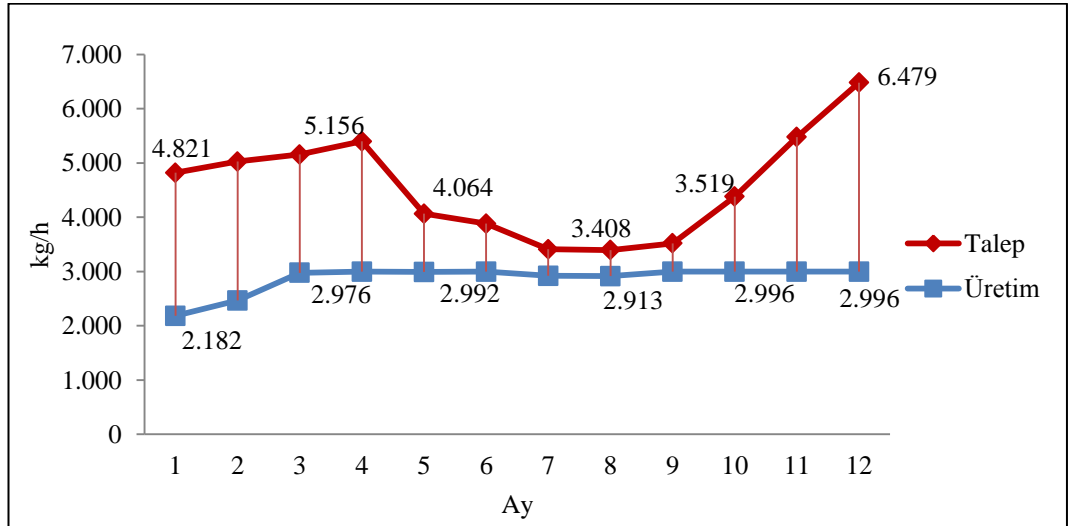
Şekil 4.3. Trijenerasyon toplam enerji üretimi

Şekil 4.3’e göre, üretilen enerji miktarı 50.685.360 kWh olarak gerçekleşirken, 57.605.760 kWh önceki yıla dair toplam enerji talebidir. Üretilen enerji miktarları verilen grafikte yük talebi eğrisine benzer şekilde uyum görülmektedir. Arada oluşan fark şebekeden alınması gerekmekte ve 6.920.400 kWh olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.4. Atık ısı kazanı buhar üretimi ve tüketim grafiği

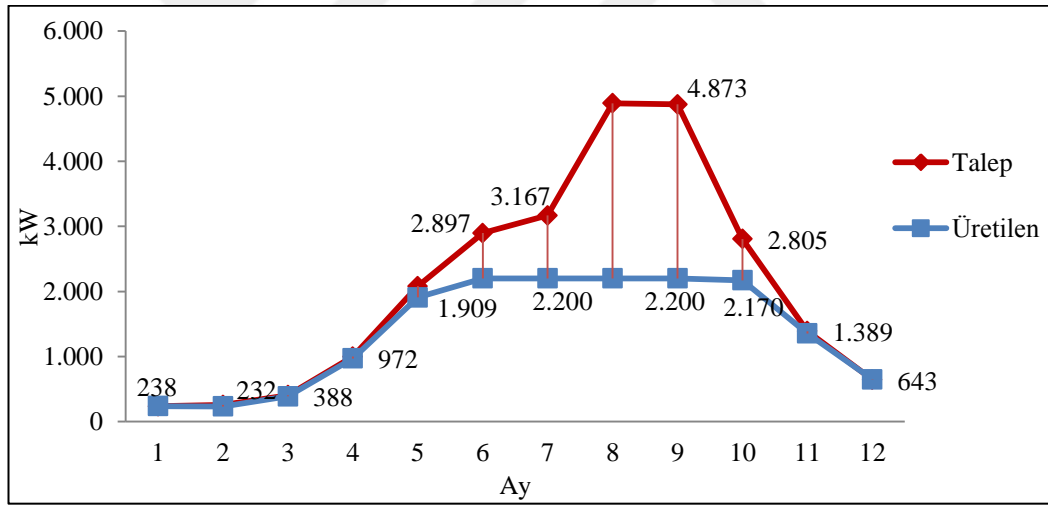
Şekil 4.4'te görüldüğü üzere, sistemin elektriksel yükü izlediği durumda, buhar üretim miktarları aşağıdaki gibi gerçekleşmektedir. Trijenerasyon sisteminin gaz motorunun elektrik üretim eğrisine benzer şekilde buhar üretimi meydana gelmiştir. Gaz motoru elektrik üretim eğrisinin ocak ve şubat ayı için eğimine bakıldığında, buhar üretiminin eğrisi daha yatay seyretmektedir. Bunun temel sebebi ise gaz motorunun kısmi yüklerde birim üretilen elektrik enerjisi başına tüketilen yakıtın artmasıdır yani, elektriksel verimde kayıp meydana gelirken aynı birim kW üretimi için yakıt sarfiyatı dolayısıyla da atılan termal enerji miktarı artmaktadır.



Şekil 4.5. Atık ısı kazanı buhar üretimi saatlik ortalama grafiği

Şekil 4.5'te buhar üretimi ortalaması grafikte zamana bağlı olup bir saate üretilen miktardır. Bu değer ile kW yani kJ/s birimi ile oluşturulan Şekil 4.2 bir noktadaki eğimi itibariyle benzerlik taşımaktadır. Bu benzeşim yılın ilk üç ayına bakılarak görülebilecektir. Ortalama olarak 2.868 kg/h buhar debisi bu koşullar altında elde edilmektedir. İstenilen nitelikte buhar üreten atık ısı kazanı sisteminin buhar üretimi 9 aydan uzun süre ile kararlı durumdadır. Yılın ilk aylarındaki düşüşün nedeni ise elektrik talebinin düşmesi sebebiyle kısmi yükte çalışan motorun buhar üretiminin azalmasıdır.

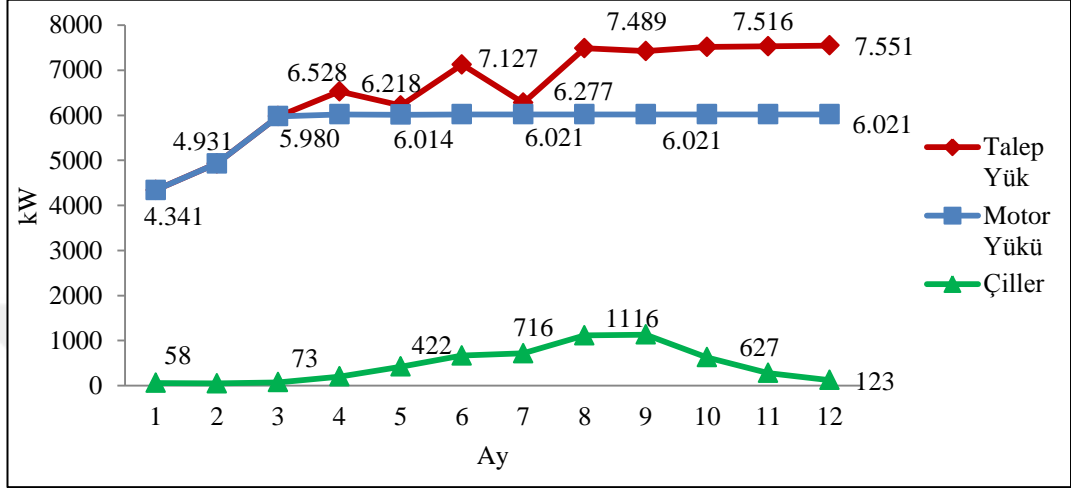
Soğutma enerjisi ihtiyacı ise 0,78 COP değerli absorpsiyonlu çiller ile şu şekildedir. Çiller sisteminin üretimi belirlendikten sonra 2015 yılına dair elektriksel tüketim verisi tekrar hesaplanmıştır. Çünkü mekanik buhar sıkıştırma çillerlere olan ihtiyaç absorpsiyonlu çiller kullanımı ile düşerek yeni elektrik talep eğrisi meydana gelecektir.



Şekil 4.6. Absorpsiyonlu çiller soğutma enerjisi üretimi

Şekil 4.6'da mevcut çalışma şartlarında absorpsiyonlu çiller ile üretilen soğutma enerjisi görülmektedir. Üretilen soğutma enerjisi absorpsiyonlu çiller ile üretilmiş olup, elektrik tüketimi çok küçük bir miktara karşılık gelmektedir. Bu durumda, önceki yıla ait elektrik şebekesi yük eğrisi çiller yükünün azalması sebebiyle azalacaktır. Bir yıl boyunca çiller sisteminin elektrik tüketimini grafiksel olarak elde ederek eski yükten bu değerlerin farkını alıp aşağıdaki grafiği elde edebiliriz. Motorun üretim eğrisinden hareketle 12.199 MWh soğutma enerjisi üretilmektedir. 20.498.400 kWh talebin % 59,5'lik kısmını karşılamaktadır. 8.299,4 MWh enerji ise

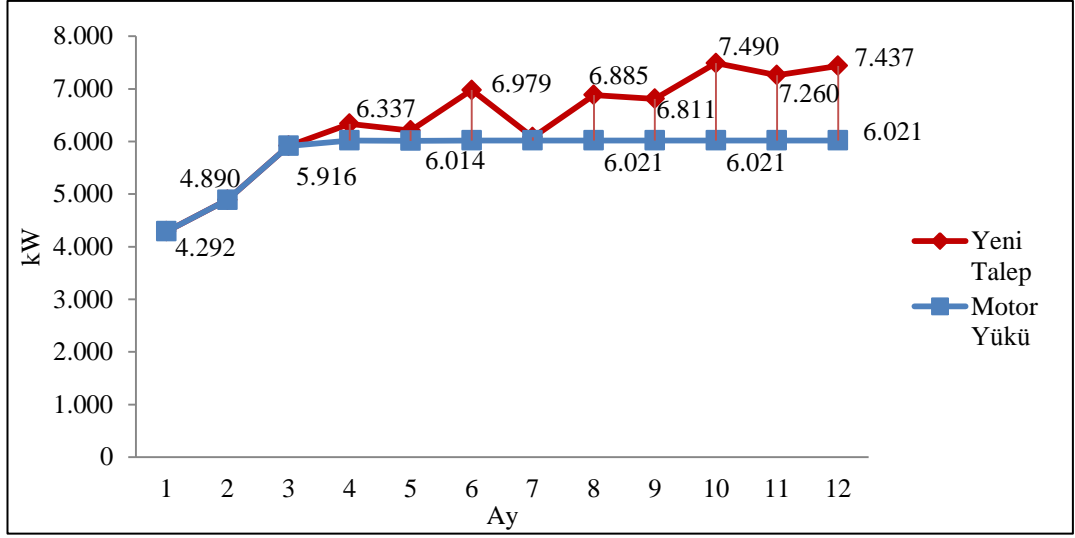
mekanik çiller sistemleri ile karşılanmalıdır. Bu durumda yeni yük ortalaması 210 kW azalacaktır. Ancak bu azalmayı tüm yıla yaymak uygun bir yaklaşım olmayacaktır. Aylık bazda bir önceki yıla ait etkinlik katsayıları da hesaba katılarak karşılanan soğutma yükünden hareketle azalan yükler ile eğri yenilenmiştir.



Şekil 4.7. Buhar sıkıştırımlı çiller yükü, talep eğrisi ve motor yükü

Şekil 4.7’de, çiller gruplarının aylık ortalama yük talebi görülmektedir. İlk durumda, talep yükü görülmekte ve gaz motorlarının çalışma yükü verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere kurulan sistem ile üretilen soğutma yükü ortalama 1.392,6 kW olarak gerçekleşmiştir. Bu değer 1.782 kW soğutma gücüne sahip tek etkili çiller ile elde edilmiştir. Sistemin etkinlik katsayısı COP=0,78 olarak kabul edilmiştir. Bu değerden hareketle, HT devresine ait 82-92 °C su çevrimi kullanılmıştır.

Yeni durumda ortalama 6.365 kW yeni talep eğrisi oluşmaktadır. Bu değere absorpsiyonlu çillerin iç tüketimi de eklendiğinde 6.382 kW ortalama talep meydana gelmektedir. Bu değer yıl ortalaması olarak karşımıza çıkmakta olup aylık bazda bakıldığında yılın yaklaşık 6,5 ayında ihtiyacın tamamını karşılayabilecektir.



Şekil 4.8. Yeni talep eğrisi ve gaz motoru yükü

Şekil 4.8' göre yeni yük ortalaması ile yılda 55.906.320 kWh enerji ihtiyacı bulunmaktadır. 2015 yılı tüketiminden bu sayı çıkartılırsa 1.699.440 kWh toplam tüketimde meydana gelen azalma olarak karşımıza çıkar. Bu yeni talep eğrisi göz önünde bulundurulduğunda, yalnızca yılın ilk üç ayı için gaz motorlarının yükü ortalama 60 kW azalacaktır. Aynı azalma termal ve elektriksel çıktısı hemen hemen eşit olan gaz motoru için bu değer ortalama olarak buhar miktarını 85,2 kg/h etkileyecek olup yüksek bir miktar olarak karşımıza çıkmamaktadır. Ayrıca, soğutma ihtiyacının çok azaldığı yılın aralık, ocak, şubat ve mart aylarında ise absorpsiyonlu çillere verilmeyen HT ceket suyu ile sıcak su üretilebilme imkanı bulunmaktadır.

Yeni buhar debisinin ortalaması ise bu şartlar altında 2.868 kg/h değerinden 2.782,8 kg/h değerine revize edilmelidir. Bu durumda atık ısı kazanı yıllık toplam 24.377 ton/yıl üretim yapılabilecektir. Tesisin son yıla dair buhar talep miktarı ise 4.583 kg/h ortalaması ile toplam 40.147 ton/yıl'dır. Tesiste bulunan buhar kazanları ile 15.769.752 kg buhar üretilmesi gerekmektedir. Bu değeri ortalama olarak hesaplayacak olursak, 1.800,2 kg/h buhar üretimine ihtiyaç duyulmakta olup, bu buharın temini için kazanlar hazırda bekletilecektir.

4.3. Çevresel Etkiler ve Ekonomik Analiz

Trijenerasyon sistemi ile elektrik, ısı ve soğutma enerjisi üretilmiş olup, son yıla ait veriler yani yük talep eğrileri oluşturularak revize edilmiştir. Son durumda trijenerasyon sistemi ile elektrik üretimi yıl boyu 5.773 kW ortalama üretim ile 50.571.480 kWh üretim gerçekleştirmektedir. Son yıla dair 6.382 kW yeni ortalama ile 55.906.320 kWh elektrik enerjisi talebi bulunan tesisin şebekeden alınacak enerji miktarı 5.334.840 kWh olarak gerçekleşecektir.

Çevresel emisyonları hesaplamada, doğalgazın tam yanma reaksiyonu göz önünde bulundurulmuştur. Teorik tam yanma denklemleri ile doğalgazın bileşimi değişkenlik göstermekte olup genel olarak %94'lük kısmı metan olup geri kalanı ise etan, propan, butan, pentan şeklinde sıralanmaktadır. Alt ısı ve üst ısı değer kavramları ile ifade edilen doğalgazın tüm trijenerasyon sistemi için 8.500 kcal/Sm³ olarak alınmıştır. Motorların yük durumuna göre yakıt tüketim değerleri üreticiden sağlanarak tüm analiz gerçekleştirilmiştir.

Çevresel etmenler açısından emisyon kazancı için literatürde geliştirilen birçok formül ve yaklaşım bulunmaktadır. Temelde ise kazanç prensibi şu şekilde ifade edilebilir. Tüm tesisin trijenerasyon sistemi kurulmadan önce elektrik için atmosfere salınan CO₂ miktarı ve buhar üretimi için sarf edilen doğalgaz kazanlarının tükettiği yakıt miktarından kaynaklanan emisyon hesaplanmalıdır.

İkinci durumda ise, trijenerasyon sisteminin elektrik, ısı ve soğutma enerjisini üretmek için kullandığı yakıtın emisyonu hesaplanmalıdır. Ek olarak, trijenerasyon sistemi yıl boyu tüm tesis ihtiyaçlarını tam olarak karşılayamadığı için dışarıdan alınması gereken elektrik ile kazanlarda üretilmesi gereken buhar miktarı için emisyon değerleri trijenerasyon sistemine eklenecektir. Son olarak kazanım sütununa çiller gruplarının elektriksel yükünün azalarak şebekeden talep edilecek enerjiye eşdeğer emisyon eklenecektir. Veya yeni yük talebi üzerinden hesaplama yapılarak bu değer başlangıçta dahil edilebilir. Bu haliyle kurulan sistemin bize kazandırmış olduğu net emisyon miktarı hesaplanacaktır.

Türkiye’de elektrik üretiminden kaynaklı emisyonların hesaplanmasında “Bir elektrik sistemi için emisyon katsayısının hesaplanmasında kullanılan araç “UNFCCC 2011” kullanılarak aşağıdaki hesaplar yapılan referans çalışma ile sunulmuştur. Buna göre Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) verileri ile doğalgaz için ortalama olarak yanma sonucu emisyon faktörü 56,1 kg CO₂/GJ değeri verilmiştir. Birim elektrik enerjisi üretimi için ise ortalama 0,5459 tCO₂/MWh_{elek.} değeri verilmiştir [59, 60].

Doğalgazın hesaplamada ısıl değeri 8.500 kcal/Sm³ kabulü ile, emisyon faktörü birim dönüşüm sonucu 0,2028 kg CO₂/kWh’tir. 1 m³ doğalgazın yanması sonucu 2,0047 kg CO₂ / Sm³ meydana gelir.

Buna göre elektrik üretimi için emisyon miktarı şu şekilde hesaplanacaktır.

$$57.605.760 \text{ kWh} \times 0,5459 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}_{\text{el}}} = 31.446.984,38 \text{ kg CO}_2 \quad (4.10)$$

Çiller sistemi ile şebeke yükünün azalması sonucu kazanılan emisyon ise şu şekilde hesaplanacaktır.

$$1.699.440 \text{ kWh} \times 0,5459 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}_{\text{el}}} = 927.724,30 \text{ kg CO}_2 \quad (4.11)$$

Isı enerjisi üretimi için salınan emisyon ise şu şekildedir.

$$40.147.806 \text{ kg/yıl} \times \frac{(570 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \times 4,184 \frac{\text{kJ}}{\text{kcal}}) / 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}}{0,92} \quad (4.12)$$

Denklem (4.12)’de görülen hesaplama sonucunda 28.908.806 kWh olarak çıkmaktadır. Bu sonuç ile emisyon faktörünün çarpımı buhar üretimi sonucu açığa çıkan emisyonu verecektir.

$$28.908.806 \text{ kWh} \times 0,2028 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}} = 5.862.706 \text{ kg CO}_2 \quad (4.13)$$

Denklem (4.10) ve (4.13) ile elde edilen emisyonların toplamı ise 37.309.960,4 kg CO₂’tir. Trijenerasyon sistemi ile emisyon salınımlarını hesaplamak içinse gaz motorlarının yük durumuna göre yakıt tüketim tabloları kullanılmıştır.

Buna göre trijenerasyon ile tüketilen doğalgaz miktarı sırasıyla 616 motoru için %50 yükte 316 m³/h, %75 yükte 454 m³/h, %100 yükte ise 592 m³/h'tir. 620 model motorda ise, %50 397 m³/h, %75 yükte 570 m³/h, %100 yükte ise 743 m³/h olup bu değerler üretici verileridir. Trijenerasyon sisteminin master olarak seçilen 620 model motoru yıl boyu tam yük koşullarında kalarak çalışması sağlanmıştır. Bu durumda yıllık yakıt tüketimi ise, aylık çalışma saatleri ve anlık yakıt tüketimlerinin toplamı olarak hesaplanmış ve yıllık doğalgaz tüketimi 11.271.696 Sm³ doğalgaz olarak gerçekleşmiştir. Bu yakıtın yanması ile ortaya çıkan emisyon ise aşağıdaki gibidir.

$$11.271.696 \text{ Sm}^3 \times 9,8855 \frac{\text{kWh}}{\text{Sm}^3} \times 0,2028 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}} = 22.597.264 \text{ kg CO}_2 \quad (4.14)$$

Buhar kazanları ile 1.800,2 kg/h üretim ihtiyacı için yakıt tüketimi hesaplanmış ve 11.354.102 kWh olarak elde edilmiştir.

$$11.354.102 \text{ kWh} \times 0,2028 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}} = 2.302.612 \text{ kg CO}_2 \quad (4.15)$$

Dışarıdan alınacak elektrik nedeniyle salınım ise aşağıdaki gibidir.

$$5.334.840 \text{ kWh} \times 0,5459 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}_{\text{el}}} = 2.912.289 \text{ kg CO}_2 \quad (4.16)$$

Tablo 4.4. Emisyon kazancı tablosu

Üretim Metodu	Elektrik	Isı	Toplam
Şebeke + Kazan	31.446.984 kg CO ₂	5.862.706 kg CO ₂	37.309.960 kg CO ₂
Trijenerasyon	25.509.553 kg CO ₂	2.302.612 kg CO ₂	27.812.165 kg CO ₂
Δ	5.937.431 kg CO ₂	3.560.094 kg CO ₂	9.975.525 kg CO₂

Tablo 4.4'e göre son durumda toplam emisyon kazancı 9.975.525 kg CO₂ olarak gerçekleşmiştir. Emisyon tasarruf oranı ise azaltılan emisyon ile toplam emisyonun yüzdesel oranı olup, % 25,45 emisyon tasarrufu gerçekleşmiştir. Enerji kazancı doğalgaz eşdeğeri ile birlikte hesaplandığında aşağıdaki tablo oluşmaktadır.

Tablo 4.5. Doğalgaz eşdeğeri emisyon ve enerji miktarı

Enerji Eşdeğeri	Yakıt Eşdeğeri	Emisyon Kazancı
177.087 GJ	4.976.069 Sm ³	9.975.525 kg CO ₂

Tablo 4.5’de verilen bu enerji eşdeğeri, emisyon kazancına bağlı doğalgaz yakıt eşdeğeri enerji olup ulusal şebekede birim kWh elektrik üretimi için kullanılan yakıt, iletim, dağıtım kayıpları, santral verimleri ile gereken enerji miktarı değildir. Bunun için ülkemiz ortalama değeri kullanılarak hesaplama yapılmalıdır. Kojenerasyon ve mikrokojenerasyon tesislerinin verimliliğinin hesaplanmasına ilişkin usul ve esaslar hakkında tebliğde referans elektrik üretim verimi olarak 0,525 alınmaktadır. Bu basit yaklaşımla şebeke elektriğinin tümünün doğalgazdan üretilmesi sonucu enerji kazancı ise 21,8 milyon kWh olarak gerçekleşecektir. Şebeke elektriğinin 0,5459 kg CO₂/kWh emisyonu nedeniyle olduğu ve kazanda üretim için ise 2,0047 kg CO₂ / Sm³ yaklaşımıyla, toplam 26,5 milyon kWh enerji kazancı elde edilecektir.

Trijenerasyon sisteminin ekonomik analizi ise yatırımın kredi ile gerçekleştirildiği durum için hesaplanmıştır. Aylık elektrik, ısı üretim miktarları ve birim fiyatları sistemin kurulacağı bölge için alınarak geri ödeme süresi çıkartılmıştır.

Tablo 4.6. Mali analiz için birim fiyat tablosu

Doğalgaz fiyatı	0,84	TL/m ³	0,255	€/m ³
T1 Elektrik alış fiyatı	0,235	TL/kWh	0,071	€/kWh
T2 Elektrik alış fiyatı	0,235	TL/kWh	0,071	€/kWh
T3 Elektrik alış fiyatı	0,235	TL/kWh	0,071	€/kWh
Doğalgaz alt ısı değeri	8.500	kcal/m ³	9,88	kW/m ³
Buhar maliyeti	19,94	€/ton		
Isı maliyeti (0,255 €/m ³ : 9,88 kW/m ³ : 0,80)	0,032	€/kWh		
Soğutma maliyeti	0,018	€/kWh		
Döviz kuru €	3,30	TL		
Su alış fiyatı	3,00	TL/m ³	0,909	€/m ³

Tablo 4.6’da birim fiyat tablosu gösterilmiştir. Yukarıda belirtilen birim değerler ile yapılan hesaplamalar sonucu Tablo 4.7 oluşturulmuştur.

Tablo 4.7. Trijenerasyon sistemi gelir gider akış tablosu

Plan Yılı	2017	2018	2019	2020	2021
1. Gelirler					
Elektrik Üretimi (MWh)	50.571	50.571	0.571	50.571	50.571
Elektrik Geliri (€)	3.590.575	3.590.575	3.590.575	3.590.575	3.590.575
Üretilen Soğuk Su (MWh/yıl)	12.199	12.199	12.199	12.199	12.199
Soğuk Su Geliri (€)	195.184	195.184	195.184	195.184	195.184
Üretilen Buhar (Bin Ton)	24.377,40	24.377,40	24.377,40	24.377,40	24.377,40
Buhar Geliri (€)	486.085	486.085	486.085	486.085	486.085
Toplam Gelirler	4.271.844	4.271.844	4.271.844	4.271.844	4.271.844
2. Giderler					
Tesis Elektrik ihtiyacı (kWh)	1.465.380	1.465.380	1.465.380	1.465.380	1.465.380
Elektrik Gideri (€)	68.872	68.872	68.872	68.872	68.872
Kredi faizi (%5 yıllık €)	162.500	142.187,50	121.875	101.562,50	81.250
Amortisman (€)	325.000	325.000	325.000	325.000	325.000
Tesis Bakım, Onarım ve Servis	402.960	402.960	402.960	402.960	402.960
Tesis sigortası (€)	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000
Yağ Sarfiyatı (ton/yıl)	12,081	12,081	12,081	12,081	12,081
Yağ Gideri (€)	36.243	36.243	36.243	36.243	36.243
Gaz Sarfiyatı (Bin m ³)	11.271,70	11.271,70	11.271,70	11.271,70	11.271,70
Gaz Gideri (€)	2.874.282	2.874.282	2.874.282	2.874.282	2.874.282
Kule Su Gideri (€)	25.571	25.571	25.571	25.571	25.571
Toplam giderler (€)	3.508.468	3.488.156	3.467.843	3.447.531	3.427.218
Kar /Zarar (+/-) (€)	763.376	783.689	804.001	824.314	844.626
Kümülatif kar/zarar (+/-) (€)	763.376	1.547.065	2.351.066	3.175.379	4.020.005

Tablo 4.8.(Devam) Trijenerasyon sistemi gelir gider akış tablosu

Plan Yılı	2022	2023	2024	2025	2026
1. Gelirler					
Elektrik Üretimi (MWh)	50.571	50.571	50.571	50.571	50.571
Elektrik Geliri (€)	3.590.575	3.590.575	3.590.575	3.590.575	3.590.575
Üretilen Soğuk Su (MWh/yıl)	12.199	12.199	12.199	12.199	12.199
Soğuk Su Geliri (€)	195.184	195.184	195.184	195.184	195.184
Üretilen Buhar (Bin Ton)	24.377,40	24.377,40	24.377,40	24.377,40	24.377,40
Buhar Geliri (€)	486.085	486.085	486.085	486.085	486.085
Toplam Gelirler	4.271.844	4.271.844	4.271.844	4.271.844	4.271.844
2. Giderler					
Tesis Elektrik ihtiyacı (kWh)	1.465.380	1.465.380	1.465.380	1.465.380	1.465.380
Elektrik Gideri (€)	68.872	68.872	68.872	68.872	68.872
Kredi faizi (%5 yıllık €)	60.937,50	40.625	20.312,50	0	0
Amortisman (€)	325.000	325.000	325.000	325.000	325.000
Tesis Bakım, Onarım ve Servis	402.960	402.960	402.960	402.960	402.960
Tesis sigortası (€)	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000
Yağ Sarfiyatı (ton/yıl)	12,081	12,081	12,081	12,081	12,081
Yağ Gideri (€)	36.243	36.243	36.243	36.243	36.243
Gaz Sarfiyatı (Bin m ³)	11.271,70	11.271,70	11.271,70	11.271,70	11.271,70
Gaz Gideri (€)	2.874.282	2.874.282	2.874.282	2.874.282	2.874.282
Kule Su Gideri (€)	25.571	25.571	25.571	25.571	25.571
Toplam giderler (€)	3.406.906	3.386.593	3.366.281	3.345.968	3.345.968
Kar /Zarar (+/-) (€)	864.939	885.251	905.564	925.876	925.876
Kümülatif kar/zarar (+/-) (€)	4.884.944	5.770.195	6.675.758	7.601.634	8.527.510

Tablo 4.7’de trijenerasyon sistemi için gelir gider akış tablosu oluşturulmuştur. Burada ekonomik analiz, statik değerlendirme metodlarından geri ödeme süresi hesabına göre yapılmıştır.

$$I = \sum_{t=1}^N \frac{X_t}{(1+R)^t} \quad (4.17)$$

Denklem (4.16)'da verilen ifadede, N geri ödeme süresi, I yatırılan tutar, t zaman, X_t t zamanındaki getiri paydadaki ifade ise paranın zaman değerini ifade eder. Gelir gider tablosu oluşturulurken toplam gelirler ile toplam giderler oranı ile hesaplama yapılmıştır.

Saatlik yağ tüketimi 0,69 kg/h olup birim fiyatı 3 TL/kg'dır. Tesis sigortası kurulum maliyetinin % 0,5 olduğu düşünülmüştür. İki motor için bakım onarım maliyeti 23 €/h alınmıştır. Yıllık trijenerasyon sistemi ile üretim yapıldığında birim elektrik üretim maliyeti 0,154 TL/kWh olacaktır. Yapılan hesaplamalarda, tesisin büyük bakım süresine kadar gelir gider tablosu oluşturulmuştur. Yukarıda verilen tabloda, gelir ve gider akışları gösterilmiş ve dinamik hesap metodu ile yatırım maliyeti olan 3.250.000 € bedeli, 4,09 yılda geri ödeyeceği görülmüştür. Yıllık ortalama 850.000 € kazanç sağladığı görülmüştür. Trijenerasyon sisteminin verimi ise sisteme verilen yakıt enerjisi tüketilen doğalgazdan hareketle 111.426.350,8 kWh'tir. Sisteme verilen enerjinin yaklaşık %10'luk bölümü gaz motorunun yüzeyinden, kazan ve boru hatları dış zarflarından ışınlam enerjisi olarak uzaklaşacak olup kullanılabilir enerji 100.283.715 kWh olarak karşımıza çıkacaktır.

$111426350,8 \times 0,9 = 100.283.715$ kWh Burada meydana gelen kayıp, gaz motorunun yüzeyinden, atık ısı kazanının yüzeyinden, çiller sisteminin yüzeyinden ve bağlantı hatlarının yüzey ışınlamı sebebiyle kayıp miktarıdır. Denklem (4.7) ile aşağıdaki hesaplama yapılmıştır.

$$EUF = \left(50.727.644 + \frac{16.381.200}{0,8} + \frac{12.199.000}{0,78} \right) / 111.426.350,8 = \% 77,9 \quad (4.18)$$

Denklem (4.18) termodinamiğin birinci yasasına göre verimdir. Işınlam enerjisi gibi önlenemeyen kayıplar sebebiyle birincil enerji miktarının kullanılabilirliğini referans alındığında ise Denklem (4.19)'da görüldüğü üzere % 86,6 verim elde edilecektir.

$$EUF = \left(50.727.644 + \frac{16.381.200}{0,8} + \frac{12.199.000}{0,78} \right) / 100.283.715 = \% 86,6 \quad (4.19)$$

Denklem (4.8)'e göre ise trijenerasyon birincil enerji tasarrufu aşağıdaki gibidir.

$$TPES=1-\frac{111.426.350,8}{\frac{50.727.644}{0,5}+\frac{16.381.200}{0,8}+\frac{12.199.000}{0,5 \times 4}} \times 100 \quad (4.20)$$

Önerilen sistemle TPES açısından % 12,96 birincil enerji tasarrufu elde edilebilecektir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Enerji üretim sistemleri incelendiğinde fosil yakıtlar ile çalışan geleneksel güç santralleri yakıt enerjisinin yalnızca üçte birini faydalı işe dönüştürebilmekte ve geriye kalan üçte ikisini düşük sıcaklıktaki ısı kuyusuna atmaktadırlar. Endüstriyel işletmelerin büyük bölümünde ise enerji ihtiyacı ayrıık olarak karşılanmaktadır. Kurulacak santralde elektrik üretimi için gaz motoru kullanan ve motor ceket soğutma suyu ile egzoz gazlarını kullanan bir trijenerasyon sistemi önerilmiştir. Trijenerasyon sistemi, ceket suyu yardımıyla absorpsiyon çillerde soğutma suyu ve egzoz gazları ile de doymuş buhar üretmektedir.

Üretici katalogları incelendiğinde motor büyüklüğü arttıkça elektriksel verim artmaktadır. Elektriksel Güç/Isı oranı artarken termal ısı/birincil enerji oranı azalmaktadır. Bu durumda elektriğin birim maliyeti ve buharın maliyeti için fiyat analizi yapıldığında elektriğin birim fiyatı 0,235 TL/kWh buharın maliyeti 65,8 TL/ton'dir. Burada aynı firmanın farklı motor seçenekleri incelendiğinde, 6 MW toplam elektriksel çıktı için, ikili ve üçlü motor seçenekleri üzerinden temel hesaplama yapılmıştır. Bir saatlik periyotta ihtiyaç duyulan ortalama elektrik enerjisi ve bunların maliyeti ve elektriğin fiyatına bakıldığından ve söz konusu motorların kataloglarına göre, elektrik üretimi maliyetleri yakıt tüketimlerine göre, buhar üretim maliyetleri ise mevcut sisteme göre elde edilmiştir.

Elektrik ihtiyacını mevcut durumda tamamen şebekeden sağlayan, buhar ihtiyacını ise doğalgaz yakıtlı kazanlardan sağlayan endüstriyel bir tesise trijenerasyon sistemi kurulması durumu için ekonomik, çevresel ve enerji analizi yapılmıştır. Sistemin elektrik ve ısı oranları göz önünde bulundurularak gaz motorlu bir trijenerasyon sistemi önerilmiştir. Tasarımın birinci önceliği sistemin elektrik talebinin belirlenmesi olmuş daha sonra, termal enerji ihtiyaçları belirlenmiştir. Bu çalışmada gaz motorunun termal ve elektriksel enerji verimi ile gaz motorlarının tüketim değerleri dikkate alınarak enerji analizleri yapılmış ve tasarlanan sistemin ekonomik ve çevresel analizi yapılmıştır.

Söz konusu işletmenin mevcut durumda 57,6 milyon kWh yıllık elektrik tüketimi, 28,9 milyon kWh ısı ve 20,5 milyon kWh soğutma ihtiyacı bulunmaktadır. Önerilen trijenerasyon sistemi ile işletme ve bakım giderlerinin de eklenmesiyle yılda 850.000 € tasarruf sağlanarak, yılda 50,7 milyon kWh elektrik, 28,6 milyon kWh termal enerji üretimi gerçekleştirecek ayrıca 9,9 milyon kg CO₂ ise daha az salınacaktır.

Yapılan çalışmanın sonuçları incelenen literatür verileri ışığında, birincil enerji tasarrufu açısından standartları sağladığı görülmüştür. Sistem seçiminin yapıldığı bu çalışmada, geri ödeme süresinin referans sistemlere nazaran yakın olduğu belirlenmiştir. Elde edilebilecek tasarruf potansiyeli ortaya konulmuştur. Esas bakıma kadar yapılan hesaplama göre, faiz ve amortisman kaleminin eklenmesiyle tüm sistem yaklaşık 4 yılda kendisini geri ödeyecektir. Önerilen sistemle % 12,96 birincil enerji tasarrufu sağlanacaktır. Tüm çalışma kapsamında yapılan hesaplamaların doğru ve tutarlı oluşu sistemin kurulmasıyla ve gerçek zamanlı olarak işletilmesi neticesinde ortaya çıkacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] İpek N., Yeşil H., Enerji Verimliliği Raporu, *TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası*, GY20123, 1-80, 2012.
- [2] Yıldız T., Enerji Verimliliği Strateji Belgesi Raporu 2012-2023, *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*, 28215, 1-21, 2012.
- [3] Calise F., Dentice A. M., Piacentino A., A Novel Solar Trigeneration System Integrating PVT (photovoltaic/thermal collectors) and SW (seawater) Desalination: Dynamic Simulation and Economic Assessment, *Energy*, 2014, **67**, 129–148.
- [4] Orlando J. A., *Cogeneration Design Guide*, 1st ed., ASHRAE, Atlanta, 1996.
- [5] Liu M., Shi Y., Fang F., Combined Cooling, Heating and Power Systems: A Survey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, **35**, 1–22.
- [6] Gündoğdu G., Zonguldak Bölge Isıtma Sistemi Yapılabilirlik Analizi Proje Sonuç Raporu, *Tübitak*, 5122101, 1-89, 2012.
- [7] Roman K. K., Alvey J. B., Selection of Prime Mover for Combined Cooling, Heating and Power Systems Based on Energy Savings, Life Cycle Analysis and Environmental Consideration, *Energy Buildings*, 2016, **110**, 170–181.
- [8] Mago P. J., Luck R., Evaluation of a Base-Loaded Combined Heating and Power System with Thermal Storage for Different Small Building Applications, *International Journal Energy Resources*, 2013, **37**(2), 179–188.
- [9] Pratt M. C., Cogeneration: A Successful Response to the Energy Crisis?, *Fordham Urban Law Journal*, 1980, **9**(3), 484-531.
- [10] Kaya D., Öztürk H., *Kojenerasyon ve Trijenerasyon Tekniği*, 1. Baskı, Umuttepe Yayınları, Kocaeli, 2014.
- [11] Darrow K., Tidball R., Wang J., Hampson A., Combined Heat and Power Partnership, Catalog of CHP Technologies, *Environmental Protection Agency*, 080315, 1-14, 2015.
- [12] Cho H., Smith A. D., Mago P., Combined Cooling, Heating and Power: A Review of Performance Improvement and Optimization, *Applied Energy*, 2014, **136**, 168–185.
- [13] Stojkov M., Hnatko E., Kljajin M., Zivic M., Hornung K., CHP and CCHP Systems Today, *Development of Power Engineering in Croatia Symposium*, Osijek, Croatia, 21 October 2011.

- [14] Merz S. K., Energy Saver Cogeneration Feasibility Guide, *Office of Environment and Heritage*, 20140685, 1-132, 2014.
- [15] Pravadalıoğlu S., Kojenerasyon Sistemleri İle Yerde Enerji Üretimi, *Türk Tesisat Mühendisleri Derneđi Dergisi*, 2012, **77**, 24-28.
- [16] Ağış Ö., Kojenerasyonun Dünu, Bugünü ve Geleceđi, *Energyworld Dergisi*, 2013, **24**, 66-68.
- [17] Yenice O. T., Kırsal Kesimde Kurulabilecek Doğalgaz Yakıtlı Otoprodüktör Kojenerasyon Santralleri Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005, 170323.
- [18] Nadir M., Ghenaiet A., Thermodynamic Optimization of Several (Heat Recovery Steam Generator) HRSG Configurations for a Range of Exhaust Gas Temperatures, *Energy*, 2015, **86**, 685–695.
- [19] Sharma M., Singh O., Exergy Analysis of Dual Pressure HRSG for Different Dead States and Varying Steam Generation States in Gas/Steam Combined Cycle Power Plant, *Applied Thermal Engineering*, 2016, **93**, 614-622.
- [20] Çengel, Y., Boles, M., *Thermodynamics:An Engineering Approach*, 5th ed., McGraw-Hill, Boston, 2011.
- [21] Badami M., Mura M., Campanile P., Anzioso F., Design And Performance Evaluation of an Innovative Small Scale Combined Cycle Cogeneration System, *Energy*, 2008, **33**(8), 1264–1276.
- [22] Al-Sulaiman F. A., Hamdullahpur F., Dincer I., Trigeneration: A Comprehensive Review Based On Prime Movers, *International Journal of Energy Research*, 2011, **35**(3), 233-258.
- [23] Sycom O., Review of Combined Heat and Power Technologies, *U.S. Department of Energy*, 98R020974, 1-31, 1999.
- [24] Wu D. W., Wang R. Z., Combined Cooling, Heating And Power: A Review, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006, **32**, 459–495.
- [25] Angrisani G., Roselli C., Sasso M., Distributed Microtrigeneration Systems, *Progress in Energy and Combustion Science.*, 2012, **38**(4), 502–521.
- [26] Ghaebi H., Saidi M. H., Ahmadi P., Exergoeconomic Optimization of a Trigeneration System for Heating, Cooling and Power Production Purpose Based on TRR Method and Using Evolutionary Algorithm, *Applied Thermal Engineering*, 2012, **36**, 113–125.
- [27] Dongfeng H., Assessment on Barriers of Chp/Trigeneration Promotion and Potential Countermeasure in China, *European Commission*, NNE5200252, 1-17, 2004.

- [28] Dunstan C., Langham E., Barriers to Trigeneration in Sydney, *Institute for Sustainable Futures*, 071109, 1-52, 2009.
- [29] Jones A., *Trigeneration Mater Plan, City of Sidney Decentralised Energy Master Trigeneration*, 1st ed., Kinesis, Sydney, 2013.
- [30] Moran M. J., Shapiro H. N., *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 5th ed., John Wiley & Sons, Chichester, 2006.
- [31] Heywood J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, Mc-Graw Hill, New York, 1988.
- [32] Pulkrabek W. W., *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*, 2nd ed., Pearson New International, New Jersey, 2014.
- [33] Kavvadias K. C., Tosios A. P., Maroulis Z. B., Design of a Combined Heating, Cooling and Power System: Sizing, Operation Strategy Selection and Parametric Analysis, *Energy Conversion Management*, 2010, **51**(4), 833–845.
- [34] Dozier C., Understanding Generator Set Ratings, *Caterpillar*, LEXE0047, 1-7, 2013.
- [35] Öz İ. H., Borat O., Sürmen A., *İçten Yanmalı Motorlar*, 1. Basım, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2013.
- [36] Öner E., Örnek Bir İşletmede Kojenerasyon Tesisi Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2006, 199428.
- [37] Kaya D., Abut N., Hergül A. S., Sapmaz S., Siemens - Dresser Rand & Guascor Power Gaz Motorları Teknik Uygunluk Değerlendirme Raporu, *Kocaeli Üniversitesi*, 27156, 1-175, 2015.
- [38] Chase D. L., *Combined Cycle Development Evolution and Future*, 1st ed., GE Power Systems, Germany, 2001.
- [39] Böke E., *Endüstri Kazanları*, 1. Basım, Doğa Yayıncılık, İstanbul, 2004.
- [40] Chen X., Gong G., Wan Z., Luo L., Wan J., Performance Analysis of 5 kW PEMFC-Based Residential Micro-CCHP with Absorption Chiller, *International Journal of Hydrogenenergy*, 2015, **40**, 10647-10657.
- [41] Yamankaradeniz R., Horuz İ., Kaynaklı Ö., Coşkun S., Yamankaradeniz N., *Soğutma Tekniği ve Isı Pompası Uygulamaları*, 3. Basım, Dora Yayınları, Bursa, 2013.
- [42] İsa K., Onat A., *İklimlendirme ve Soğutma Sistemlerinde Enerji Verimliliği*, 1. Basım, Doğa Yayıncılık, İstanbul, 2012.

- [43] Kong X. Q., Wang R. Z., Wu J. Y., Huang X. H., Huangfu Y., Wu D. W., Experimental Investigation of a Micro-Combined Cooling, Heating and Power System Driven by a Gas Engine, *International Journal of Refrigeration*, 2005, **28**(7), 977–987.
- [44] Maidment G. G, Tozer R. M., Combined Cooling Heat and Power in Supermarkets, *Applied Thermal Engineering*, 2002, **22**(6), 653–65.
- [45] Cardona E., Piacentino A., A Methodology for Sizing a Trigeneration Plant in Mediterranean Areas, *Applied Thermal Engineering*, 2003, **23**, 1665–1680.
- [46] Chicco G., Mancarella P., Assessment of the Greenhouse Gas Emissions From Cogeneration and Trigeneration System - Part I: Models and Indicators, *Energy*, 2008, **33**, 410–417.
- [47] Mancarella P., Chicco G., Assessment of the Greenhouse Gas Emissions From Cogeneration and Trigeneration Systems. Part II: Analysis Techniques and Application Cases, *Energy*, 2008, **33**, 418–430.
- [48] Rocha M. S., Andreos R., Moreira J. R. S., Performance Tests of Two Small Trigeneration Pilot Plants, *Applied Thermal Engineering*, 2012, **41**, 84–91.
- [49] Minciuc E., Corre O. L., Athanasovici V., Tazerout M., Bitir I., Thermodynamic Analysis of Tri-generation with Absorption Chilling Machine, *Applied Thermal Engineering*, 2003, **23**(11), 1391–1405.
- [50] Calva E. T., Núñez M. P., Toral M. A. R., Thermal Integration of Trigeneration Systems, *Applied Thermal Engineering*, 2005, **25**, 973–984.
- [51] Pagliarini G., Corradi C., Rainieri S., Hospital CCHP System Optimization Assisted by TRNSYS Building Energy Simulation Tool, *Applied Thermal Engineering*, 2012, **44**, 150–158.
- [52] Suárez C. C., Santos A. C., Gil M. C., Tri-generation System to Couple Production to Demand in a Combined Cycle, *Energy*, 2012, **40**(1), 271–290.
- [53] Santana M. F., Rodolfode M. N., Use of the Task Configuration System (TCS) for the Design and on-Line Optimization of Powerplants Operating with Variable Loads, *Applied Thermal Engineering*, 2009, **29**(23), 455–461.
- [54] Pitanga M. R., Derek H., Alexandre T., Reis P. J. A., Thermodynamic Analysis of Tri-generation Systems Taking Into Account Refrigeration, Heating and Electricity Load Demands, *Energy Build*, 2010, **2**(12), 2323–2330.
- [55] Li H., Fu L., Geng K., Jiang Y., Energy Utilization Evaluation of CCHP Systems, *Energy and Buildings*, 2006, **38**, 253–257.
- [56] Balli O., Aras H., Hepbasli A., Thermodynamic and Thermoeconomic Analysis of a Trigeneration (TRIGEN) System with a Gas-Diesel Engine: Part I – Methodology, *Energy Conversion Management*, 2010, **51**, 2252–2259.

- [57] Horlock J. H., *Thermodynamics and Economics*, 1st ed., Pergamon Press, New York, 1987.
- [58] Wang J. J., Jing Y. Y., Zhang C. F., Zhai J. Z., Performance Comparison of Combined Cooling Heating and Power System in Different Operation Modes, *Applied Energy*, 2011, **88**(12), 621–631.
- [59] Ülgen S., Nükleer Enerjiye Geçişte Türkiye Modeli II, *EDAM*, 9789944013345, 1-156, 2012.
- [60] Aslanoğlu S. Y., Köksal M. A., Elektrik Üretimine Bağlı Karbondioksit Emisyonunun Bölgesel Olarak Belirlenmesi ve Uzun Dönem Tahmini, *Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi*, 2012, **1**, 19–29.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Hergül A. S.**, Kaya D., Çoban V., Energy, Environment and Economic Analysis of Designed Trigeneration System, *Journal of Ecosystems and Ecology Science*, 2016, **6**(4), 575-580.



ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Serhan HERGÜL, 1989 yılında Emet'te doğdu. İlk ve ortaokul eğitimini Emet'te tamamladı. Lise eğitimini ise Kütahya Tavşanlı Anadolu Öğretmen Lisesinde tamamladıktan sonra 2007 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Biyomühendislik bölümünü kazandı. İki yıl sonra 2009 senesinde Yalova Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünü yeni bir sınav süreci ile bölüm birincisi olarak kazandı. Hazırlık ve dört yıllık lisans eğitimi sonucunda 2014 yılında bölümünü ilk beşte tamamladı. 2014 yılında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitimine, Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalında ise Araştırma Görevlisi olarak göreve başlamıştır.