



**TRİJENERASYON SANTRALLERİNDE GAZ TÜRBİNİ GİRİŞ HAVASI
SICAKLIĞININ ELEKTRİK ÜRETİM VERİMİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Engin BÜYÜKKABAKCI

Danışman

Doç. Dr. Ahmet YÖNETKEN

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2023

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TRİJENERASYON SANTRALLERİNDE GAZ TÜRBİNİ GİRİŞ
HAVASI SICAKLIĞININ ELEKTRİK ÜRETİM VERİMİNE
ETKİSİ**

Engin BÜYÜKKABAKCI

Danışman

Doç. Dr. Ahmet YÖNETKEN

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Engin BÜYÜKKABAKCI tarafından hazırlanan “Trijenerasyon Santrallerinde Gaz Türbini Giriş Hava Sıcaklığının Elektrik Üretim Verimine Etkisi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 06/07/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Ahmet YÖNETKEN

İmza

Başkan : Prof. Dr. Yüksel OĞUZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Ahmet YÖNETKEN
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Ahmet BİÇER
Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi,
Göhlisar Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

07 / 06 / 2023

Engin BÜYÜKKABAKCI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TRİJENERASYON SANTRALLERİNDE GAZ TÜRBİNİ GİRİŞ HAVASI SICAKLIĞININ ELEKTRİK ÜRETİM VERİMİNE ETKİSİ

Engin BÜYÜKKABAKCI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ahmet YÖNETKEN

Bu araştırmada, trijenerasyon santrallerinde enerji üretmek için kullanılan gaz türbinlerinin, çeşitli sıcaklıklardaki türbin giriş havası ile çalışması araştırılmıştır. Günümüz dünyasında enerjinin ve enerjiyi verimli kullanabilmenin önemi gittikçe artmaktadır. Gelişen nüfus ve teknolojiler ihtiyaç duyduğumuz enerjiyi arttırmış ve bununla birlikte enerji maliyetleri ciddi seviyelere ulaşmıştır. Tüm bunlar enerjinin verimli kullanılmasının gerekliliğini ortaya koymuştur. Trijenerasyon santralleri yüksek verime sahip olması, yerinde elektrik üretimi ile hat kayıplarının önüne geçmesi ve bileşik enerji üretimi sağlaması sebebiyle konvansiyonel üretime göre daha az fosil yakıt tüketimi sağlamaktadır. Çalışmamızda trijenerasyon santralinde kullanılan Solar Turbines Taurus 60 gaz türbininin giriş havasının soğutularak elektrik üretim verimindeki artış incelenmiş olup türbin giriş havasının 41,2 °C'den 9,1 °C'ye soğutulması ile elektrik aktif güç üretiminde %30,08 artış olduğu sonucuna varılmıştır.

2023, ix + 81 sayfa

Anahtar Kelimeler: Trijenerasyon santralleri, Kojenerasyon santralleri, Gaz türbini, Yerinde elektrik üretim, Enerji santralleri, Enerji verimliliği.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

THE EFFECT OF GAS TURBINE INLET AIR TEMPERATURE ON ELECTRICITY PRODUCTION EFFICIENCY IN TRIGENERATION POWER PLANTS

Engin BÜYÜKKABAKCI

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Renewable Energy Systems Main Science

Supervisor: Assoc. Prof. Ahmet YÖNETKEN

In this research, the operation of gas turbines used to generate energy in trigeneration power plants with turbine inlet air temperature at various temperatures was investigated. In today's world, the importance of energy and efficient use of energy is increasing day by day. Developing population and technologies have increased the energy we need, and with it, energy costs have reached serious levels. All these have revealed the necessity of efficient use of energy. Trigeneration power plants provide less fossil fuel consumption compared to conventional generation, as they have high efficiency, prevent line losses with on-site electricity generation, and provide combined energy production. In our study, the increase in electricity generation efficiency by cooling the inlet air of the Solar Turbines Taurus 60 gas turbine used in the trigeneration power plant was investigated. It was concluded that there was an increase of 30,08% in electrical active power production by cooling the turbine inlet air from 41,2°C to 9,1°C.

2023, ix + 81 pages

Keywords: Trigeneration plants, Cogeneration plants, Gas turbines, Onsite power generation, Energy plants, Energy efficiency.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Ahmet YÖNETKEN, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Engin BÜYÜKKABAKCI
Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
RESİMLER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
2.1 Enerji Yönetimi.....	4
2.1.1 Enerji Tasarrufu	6
2.1.2 Enerji Verimliliğinin Arttırılması	6
2.1.3 Karbondioksit Emisyonlarının Azaltılması.....	6
2.1.4 Daha İyi İşletme Performansı.....	6
2.2 Enerji Yönetiminde Entegre Yapılar	7
2.2.1 Talep Yönetimi.....	8
2.3 ISO 50001 Enerji Yönetim Standartı.....	9
2.3.1 Enerji Yönetim Sistemi Planlaması	9
2.3.2 Enerji Yönetim Sistemi Uygulaması.....	10
2.3.3 Enerji Yönetim Sistemi Performansının İzlenmesi ve Değerlendirilmesi ...	10
2.4 Enerji Yöneticisi	11
2.5 Enerji Yönetiminde PUKO Çevrimi.....	11
2.6 Termodinamik Yasaları	13
2.6.1 Termodinamiğin 1. Kanunu	13
2.6.2 Termodinamiğin 2. Kanunu	13
2.7 Çalışmayla İlgili Literatür Taraması.....	15
3. MATERYAL ve METOT	28
3.1 Materyal	28
3.1.1 Trijenerasyon Santralleri.....	28

3.1.2 Jeneratörler	30
3.1.2.1 Senkron Jeneratörler	32
3.1.2.2 Rotor	32
3.1.2.3 Çıkık Kutuplu Rotor	33
3.1.2.4 Silindirik Kutuplu Rotor	34
3.1.2.5 Stator	35
3.1.2.6 Frekans	35
3.1.2.7 Uyarma Akımı	36
3.1.2.8 Jeneratör Derecelendirmesi	37
3.1.3 Gaz Türbinleri ve Bileşenleri	38
3.1.3.1 Kompresör	40
3.1.3.2 Yanma Odası	43
3.1.3.3 Türbin	43
3.1.3.4 Difüzör	45
3.1.4 Transformatörler	45
3.1.4.1 Güç Transformatörleri	46
3.1.5 Atık Isı Kazanları	47
3.1.6 Ekonomizerler	48
3.1.7 Absorbsiyonlu Chiller	49
3.2 Metot	51
4. BULGULAR	59
4.1 Matematiksel Hesaplamalar	59
4.2 Türbin Giriş Havaasının Soğutulmasının Elektrik Üretimine Etkisi	61
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	74
6. KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ	81

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

MW	Megawatt
kW	Kilowatt
K	Kelvin
AC	Alternatif Akım
DC	Doğru Akım
Hz	Hertz
kVA	Kilo volt amper
MVA	Mega volt amper
kWh	Kilowatt/saat
MWh	Megawatt/saat
kcal	Kilokalori
kJ	Kilojoule
M	Metre
V	Volt
Li-Br	Lityum bromür
°C	Derece
Sm ³	Standart metreküp
m ³	Metreküp
S-CO ₂	Süperkritik akışkan

Kısaltmalar

AG	Alçak gerilim
EMF	Elektromanyetik frekans
EnPG	Enerji performans göstergesi
EnYS	Enerji yönetim sistemi
EnRÇ	Enerji referans çizgisi
GHS	Giriş havası soğutma
GT	Gaz türbini
HVAC	Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme
ISO	Uluslararası standartlar teşkilatı
ORC	Organik rankine çevrimi
ÖEK	Önemli enerji kullanıcısı
PUKO	Planla, uygula, kontrol et, ve ölç
PCD	Kompresör çıkış basıncı
RPM	Dakikadaki devir sayısı
T1	Türbin giriş havası sıcaklığı
T5	Yanma odası sıcaklığı
TL	Türk lirası
YG	Yüksek gerilim

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Enerji yönetim planı akış şeması.....	5
Şekil 2.2 Puko çevrimi	12
Şekil 3.1 Trijenerasyon diyagramı	28
Şekil 3.2 Trijenerasyon santralleri çıktıları	30
Şekil 3.3 Sinüs dalgası	32
Şekil 3.4 Rotor ve stator.....	33
Şekil 3.5 Çıkık kutuplu rotor.....	34
Şekil 3.6 Gaz türbini.....	40
Şekil 3.7 Kompresör ve kanatları	41
Şekil 3.8 Türbin güç kanatları	44
Şekil 3.9 Sistemin akış diyagramı	52
Şekil 3.10 Taurus 60 performans grafiği.....	53
Şekil 3.11 Türbin iç yapısı	54
Şekil 3.12 Jeneratör iç yapısı.....	55
Şekil 4.1 Aktif güç / türbin giriş havası sıcaklığı ilişkisi	62
Şekil 4.2 Aktif güç / T1 sıcaklığı regresyon grafiği	70
Şekil 4.3 PCD / T1 sıcaklığı regresyon grafiği	71
Şekil 4.4 Aktif güç / PCD regresyon grafiği	72
Şekil 4.5 Aktif güç, PCD ve T1 regresyon model özeti	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Taurus 60 gaz türbini teknik verileri.....	52
Çizelge 3.2 Türbin iç yapısı	54
Çizelge 3.3 Alstom step-up transformatör teknik verileri	56
Çizelge 3.4 Shuangliang absorpsiyonlu chiller teknik verileri	57
Çizelge 4.1 Türbin kontrol paneli fark verileri.....	64
Çizelge 4.2 Türbin sıcaklık, elektrik üretim(kW) ve PCD verileri	64
Çizelge 4.3 Türbin giriş havası ve aktif güç üretimi fark verileri	73
Çizelge 4.4 Türbin giriş havası sıcaklığı ve PCD fark verileri	73

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Gaz türbini kanatları	41
Resim 3.2 Absorbsiyonlu chiller.....	50
Resim 3.3 Leroy Somer jeneratör	56
Resim 4.1 Türbin kontrol ekranı	63
Resim 4.2 Türbin kontrol ekranı	63



1. GİRİŞ

Enerji, modern yaşamın temel taşlarından biridir ve günlük faaliyetlerimizin büyük bir kısmında kullanılır. Ancak enerji kaynaklarının sınırlı olduğu ve çevresel etkileri nedeniyle enerjinin etkin ve verimli kullanılması önemli bir konudur. Enerjinin etkin ve verimli kullanılması, hem ekonomik hem de çevresel açıdan bir dizi fayda sağlar.

Enerjinin etkin kullanımı, enerjinin gereksiz şekilde israf edilmesini önleyerek enerji tasarrufu gerçekleştirir. Bu, enerji maliyetlerini azaltır ve kaynakların daha sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlar. Birçok alanda enerji verimliliğinin artırılması mümkündür. Örneğin, binalarda enerji verimliliğini artırmak için yalıtım, enerji tasarruflu aydınlatma ve ısıtma/soğutma sistemleri kullanılabilir. Sanayi tesislerinde enerji verimliliğini artırmak için daha verimli ekipmanlar ve süreçler benimsenebilir. Ulaşım sektöründe ise yakıt verimliliğini artırmak için hibrit veya elektrikli araçlar tercih edilebilir.

Enerjinin verimli kullanılması, enerji kaynaklarının daha az kullanılarak aynı miktarda veya daha fazla enerji elde edilmesini sağlar. Bu da enerji verimliliğinin artırılmasının doğrudan ekonomik faydaları olduğu anlamına gelir. Enerji verimliliği arttıkça enerji maliyetleri düşer ve işletmeler, hane halkları ve endüstriler daha az enerji harcayarak aynı hizmetlerin yapılması sağlanır. Aynı zamanda enerji ithalatına olan bağımlılık azalır ve enerji güvenliği artırılmış olur. Enerji verimliliği aynı zamanda işletmelerin rekabet gücünü artırır, yeni iş olanakları yaratır ve ekonomik büyümeyi destekler.

Enerji verimliliğinin artırılması aynı zamanda çevresel faydalar sağlar. Enerji tüketimi azaldıkça fosil yakıtlardan kaynaklanan sera gazı emisyonları da azalır. Bu da iklim değişikliğiyle mücadelede katkı sağlar. Ayrıca enerji verimliliği sayesinde hava kirliliği ve çevresel etkiler de azalır.

Enerjinin etkin ve verimli kullanılması için bir dizi strateji ve yöntem bulunmaktadır. İlk adım, enerji tüketiminin analiz edilmesidir. Bu, enerji tüketiminin nerede, ne zaman ve nasıl gerçekleştiğini anlamak için önemlidir. Enerji yönetim sistemlerinin kurulması ve

enerji tasarruflu cihazların tercih edilmesi gibi önlemler alınabilir. Sanayi sektöründe enerji verimliliği için ekipmanların düzenli bakımı, verimli süreçlerin benimsenmesi ve atık ısınn geri kazanımı gibi yöntemler uygulanabilir. Ulaşım sektöründe ise hibrit veya elektrikli araçlara geçiş, toplu taşıma sistemlerinin geliştirilmesi ve sürücülerin yakıt tasarrufu tekniklerini uygulaması gibi önlemler alınabilir.

Enerji verimliliği aynı zamanda toplumların ve bireylerin farkındalık düzeyini artırmayı gerektirir. Enerji tasarrufu ve verimli kullanımıyla ilgili bilinçlendirme kampanyaları düzenlenmeli, enerji verimliliği hedefleri ve teşvikler belirlenmeli ve enerji verimliliği konusunda eğitim programları düzenlenmelidir. Enerji verimliliği politikalarının oluşturulması ve teşvik edilmesi de önemlidir.

Bu çalışma da enerjinin etkin ve verimli kullanılması adına gaz türbinlerinde türbin giriş havasının soğutulması ile elektrik üretiminde aktif güç artışının sağlanması incelenmiş ve sonuçlar tartışılmıştır.

Türbin giriş havasının soğutulması, enerji üretim tesislerinde özellikle gaz türbinlerinde kullanılan bir tekniktir. Bu teknik, türbinin performansını ve verimliliğini artırmayı hedefler, birçok avantajlar sağlar ve enerji üretim sürecinde verimlilik üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir (Çiftkaya 2010).

Türbinler, elektrik enerjisi üretmek için kullanılan önemli ekipmanlardır. Ancak, türbinlerin çalışma sıcaklıkları yüksek olabilir ve bu da bazı enerji kayıplarına neden olabilir. Bu sorunu çözmek için türbin giriş havasının soğutulması yöntemi kullanılır.

İlk olarak, türbin giriş havasının soğutulması, havanın yoğunluğunu artırır. Soğutma işlemiyle birlikte hava sıcaklığı düşer ve havanın yoğunluğu artar. Daha yoğun hava, aynı hacimde daha fazla oksijen molekülü taşır. Bu da yanma sürecini optimize eder ve yakıtın daha verimli bir şekilde yanmasını sağlar. Sonuç olarak, daha fazla enerji üretilir ve türbinin verimliliği artar.

İkinci olarak, türbin giriş havasının soğutulması, türbin kanatları üzerindeki genleşme etkisini azaltır. Isınmış hava türbin kanatlarından geçerken genleşir ve bu da enerji

kaybına neden olabilir. Ancak, soğutma işlemi ile giriş havasının sıcaklığı düşer ve bu genişleme etkisi azalır. Bu da türbinin kanatlarının daha verimli bir şekilde çalışmasını sağlar, enerji kayıplarını azaltır ve türbin verimliliğini artırır.

Tüm bunları detaylı olarak inceleyebilmek adına çalışmamızda 5,2 MW'lık Solar Turbines Taurus 60 model bir gaz türbinin çeşitli sıcaklıklarda çalışmasını gözlemleyerek veriler elde toplanmıştır. Elde ettiğimiz bu verileri analiz ederek konuyla ilgili net bulgular ve sonuçlar ortaya konulmuştur.

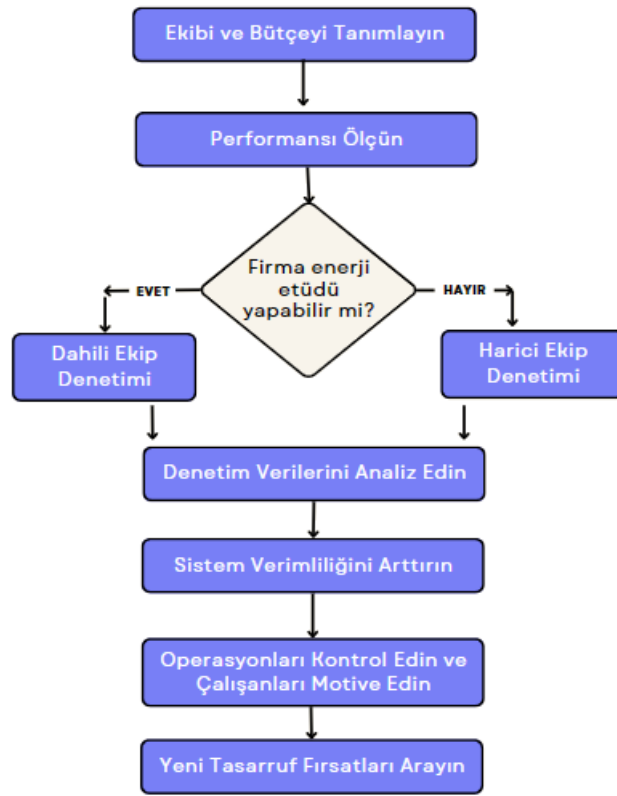


2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Enerji Yönetimi

Enerji, modern toplumun en önemli kaynaklarından biridir ve endüstri, ticaret, konut ve ulaşım sektörlerinde yaygın olarak kullanılır. Ancak, enerjinin kullanımı doğal kaynakların tükenmesine, çevre kirliliğine ve küresel iklim değişikliğine neden olabilir. Bu nedenle, enerji yönetimi, enerjinin etkili kullanımını sağlamak ve bu olumsuz etkileri en aza indirmek için önemlidir. Enerji yönetimi; Ürün güvenliğinden, kalitesinden, çevre koşullarından taviz vermeden ve yapılan üretimi azaltmadan enerji kullanımının olduğundan verimli bir şekilde yapılandırıldığı disiplinli ve organize çalışma olarak tanımlanabilir. Bugün yüksek düzeyde enerji verimli binalar tasarlamak, geçmişe göre çok daha uygun maliyetlidir. Çünkü işletme sırasında sağlayacakları enerji tasarrufu nedeniyle, enerji tasarrufu için ek maliyetler kısa sürede kendini amorti edecektir. Bu olumlu gelişmeler, ihtiyaç duyulan enerji miktarını doğrudan azaltacak ve hava kirliliği ile sera gazı emisyonlarına olumlu katkı sağlamaktadır (Yıldırım 2022).

Günümüzde küresel ısınma ve buna bağlı iklim değişiklikleri ile mücadelede hemen hemen tüm devletler, kendi topraklarında faaliyet gösteren özel ve kamu kuruluşlarına, belirleyici mevzuata uymaları için baskı yapmaktadır. İşletme ve yatırım maliyetlerinin düşürülmesi, tüm kuruluşların faaliyet gösterdikleri alanda rekabet edebilmeleri, hava ve su kirliliğini azaltmak için çevre standartlarını karşılama çabalarındaki en önemli itici güçlerden biridir. Enerji yönetimi, kuruluşların kısa vadeli hayatta kalmaları ve uzun vadeli başarıları için bu kritik hedeflere ulaşmaları için etkili bir araçtır. Yeni enerji verimliliği teknolojileri ve malzemelerinin yardımıyla enerji yönetimi, kuruluşların üretkenliklerini artırmalarına ve hizmet veya ürün kalitelerini iyileştirmelerine yardımcı olur. Bu bağlamda kuruluşlar, enerji kullanımlarını ve maliyetlerini azaltmak için etkin enerji yönetimi geliştirirler. Bir enerji yönetim planı genellikle beş adımdan oluşur: tanımla, ölç, analiz et, iyileştir ve kontrol et. Enerji yönetimi planlamasının ana hedeflerinden biri, güvenli ve konforlu bir çalışma ortamında enerji verimliliğini sürekli iyileştirmektir. Bir diğeri ise ekonomik analizlerle birlikte aksiyon planı oluşturmak ve çalışanlara tüm faaliyetlerinde sürekli enerji tasarrufu için rehberlik etmektir. Etkili bir enerji yönetimi planı için tipik akış şeması, Şekil 2.1'deki gibidir.



Şekil 2.1 Enerji yönetim planı akış şeması (Lee ve Guiberteau 2014).

Enerji yönetim planının gerçekleştirilmesi için öncelikle bir ekip oluşturulmalı ve bu ekip tarafından planlanan faaliyetler uygulanmalı, izlenmeli ve raporlanmalıdır. Özetle, tesisin mevcut enerji görünümünün belirlenmesinin ardından sistem verimliliğinin artırılması için gerekli adımlar atılmaktadır. Uygulama sonuçları sürekli izlenir ve çalışanlar sürekli iyileştirme için motive edilir.

Bu süreç, enerji tasarrufu sağlamak, enerji verimliliğini artırmak, karbondioksit emisyonlarını azaltmak ve enerji maliyetlerini düşürmek gibi hedefleri gerçekleştirmeye yardımcı olur. Bu nedenle, enerji yönetimi, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için hayati bir araçtır.

Enerji yönetimi, birçok fayda sağlar. Bunlar arasında şunlar bulunur;

2.1.1 Enerji Tasarrufu

Enerji yönetimi, enerji kullanımını izleme ve analiz etme yoluyla enerji tasarrufu sağlar. Bu tasarruf, enerji faturalarının düşürülmesine ve enerji kaynaklarının daha etkili kullanılmasına katkıda bulunur.

2.1.2 Enerji Verimliliğinin Arttırılması

Enerji kullanımını optimize ederek enerji verimliliğini artırır. Bu, daha az enerji kullanarak aynı hizmeti sağlamak anlamına gelir ve enerji maliyetlerinin düşürülmesine yardımcı olur.

2.1.3 Karbondioksit Emisyonlarının Azaltılması

Enerji kullanımının azaltılması ve daha az fosil yakıt kullanılması yoluyla karbondioksit emisyonlarını azaltır. Bu, çevreye olan etkiyi azaltır ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmayı destekler.

2.1.4 Daha İyi İşletme Performansı

İşletmelerin enerji kullanımını optimize etmelerine ve daha verimli hale getirmelerine yardımcı olur. Bu, işletmenin performansını artırır ve daha rekabetçi hale gelmesine katkıda bulunur.

Enerji yönetimi, çeşitli alanlarda uygulanabilir. İşletmeler, endüstriyel tesisler, binalar, kamu kurumları, evler ve diğer organizasyonlar, enerji yönetimi sistemlerinden faydalanabilirler.

Enerji yönetimi uygulamaları, enerji kullanımını toplamak, izlemek, analiz etmek ve kontrol etmek için otomatik cihazlar ve yazılımlar kullanır. Bu cihazlar, enerji tüketimini ölçmek için sensörler kullanır ve bu verileri bir merkezi veri tabanına gönderir. Yazılımlar, verileri analiz ederek enerji kullanımının nasıl optimize edilebileceğine dair öneriler sunar (Uzun ve Değirmen 2018).

Enerji kullanımını izlemek için kullanılan iki ana yönteme dayanır. Bu yöntemler enerji izleme ve enerji analizleridir.

Enerji izleme, enerji kullanımını doğrudan ölçerek gerçek zamanlı veriler sağlar. Bu veriler, enerji kullanımının hangi alanlarda ve ne zaman olduğunu gösterir. Enerji analizi ise, enerji verilerini analiz ederek enerji kullanımının nasıl optimize edilebileceğine dair öneriler sunar. Bu  neriler, enerji tasarrufu sağlamak, enerji verimliliğini artırmak ve enerji maliyetlerini düşürmek için kullanılabilir. Enerji yönetimi uygulamaları, ayrıca enerji kullanımının etkisini ölçmek için performans göstergeleri de kullanır. Bu göstergeler, enerji verimliliği, karbondioksit emisyonları ve enerji tasarrufu gibi faktörleri ölçerek enerji yönetimi stratejilerinin etkililiğini değerlendirmeye yardımcı olur.

2.2 Enerji Yönetiminde Entegre Yapılar

Entegre yapılarda ihtiyaç duyulan enerji, nihai tüketim noktalarına ulaşmadan önce uzun bir enerji zincirinden dönüştürülür. Bu dönüşümün çıkış noktası birincil enerji kaynaklarıdır. Erişilebilirlik, bulunabilirlik ve kabul edilebilirlik, enerji kaynaklarının kullanımında ana kriterler arasında yer almaktadır. Kömür, doğal gaz, ham petrol gibi fosil kaynaklar ile hidro, r zɡ r, jeotermal ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklar elektrik, ısı ve soğutma açısından enerji ta ıyıcılarına dönüştürülür. Ta ınabilirlik, verimlilik ve kayıplar, enerji taşıyıcıları için tercih kriterleri arasındadır. Enerji taşıyıcıları, nihai tüketimden önce metalara dönüştürülür. Elektrik, aktif ve reaktif bileşenlere dönüşürken, ısı, ısıtma ve kullanım sıcak suyu için sıcak suya dönüşür. Soğutma, soğutma için soğuk suya dönüşür.

Entegre yapılar, ihtiyaç duydukları enerji türleri bakımından benzerdir. Ancak enerji tüketim özellikleri türlerine göre farklılık göstermektedir. Tüm bu gereksinimlerin belirlenmesinin merkezinde insan için etkin ve verimli konfor alanlarının oluşturulması yer almaktadır. İnsanların konforu temel olarak termal, görsel ve akustik konfor olmak üzere üç başlık altında ele alınabilir. Isıl konforun sağlanması, yaşanılan veya çalışılan ortamın sıcaklığı, hava kalitesi ve bağlı nemin kontrol altında tutulması ile mümkündür.

Binanın mimari ve pasif mekanik ölçü ve özellikleri akustik ve görsel konfor olarak öne çıksa da ısı konforu sağlamak için çoğu zaman yeterli olamamaktadır. Bu nedenle doğal gün ışığının yeterli olmadığı mekân ve zaman aralıklarında ısıtma, soğutma ve havalandırma ihtiyacı için iklimlendirme sistemlerinin, görsel konfor için yapay aydınlatmanın kullanılması kaçınılmazdır.

2.2.1 Talep Yönetimi

Talep yönetimi, enerji tasarrufuyla değil, maliyet yönetimiyle ilgilidir. Servis sağlayıcı dağıtım şirketleri de dahil olmak üzere tüm kuruluşlar, enerji taleplerinin düz bir çizgide olmasını, mümkün olduğunca açma-kapama piklerinden arınmış olmasını ister çünkü geçici anlık pik yükler sistemin tasarım boyutunu ve dolayısıyla maliyeti artıracaktır.

Türkiye'nin de içinde bulunduğu ülkelerin elektrik tüketim talebi gündüz ortalamasına göre akşam (17:00-22:00) daha yüksek, gece (22:00-06:00) ise daha düşüktür. Bu kapsamda elektrik dağıtım şirketleri, açma-kapama pik yüklerini azaltmak için akşam saatlerinde negatif, gece saatlerinde ise pozitif teşvik uygulamaktadır. Endüstriyel tesisler için uygulanan bu tür teşviklere gerekli üretim planlaması yapılarak uyum sağlamak entegre yapılara göre daha kolaydır.

Entegre yapılar çoğunlukla hizmet üreten tesisler olduğu ve hayatın doğal akışının bir parçası olduğu için uygulanan teşviklere uyum sağlamak zordur. Örneğin sadece elektrik ucuz diye tüm öğretim faaliyetlerini gündüz yerine gece saatlerine kaydırmak mümkün değil. Ancak entegre yapılar için enerji depolama veya enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi gibi farklı talep yönetimi araçları da mümkündür. Elektrik depolama hala nispeten pahalı teknolojiler arasında yer alsa da termal ve buz depolama teknolojileri ısıtma ve soğutma enerjisi talepleri için önemli alternatiflerdir. Entegre bir yapının bir günlük toplam ısıtma veya soğutma ihtiyacı altında tasarlanan termal veya buz depoları ile ısıtma ve soğutma ünitelerinin kapasitesinin, gerekli alan ihtiyacının ve yatırım maliyetinin düşürülmesi mümkündür. Öte yandan, kullandıkları yakıt enerjisini yüksek verimli absorpsiyonlu chiller ile elektrik, ısıtma ve soğutma enerjisine dönüştüren kojenerasyon ve trijenerasyon sistemleri, enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi ve talep yönetiminde entegre yapılar için etkin bir çözüm alternatifi sunmaktadır.

2.3 ISO 50001 Enerji Yönetim Standartı

ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi (EnYS) standardı, işletmelerin enerji performanslarını artırmalarına ve enerji tüketimlerini azaltmalarına yardımcı olan bir yönetim sistemidir. Bu standart, enerji yönetim sistemi kurmak, uygulamak, sürdürmek ve sürekli iyileştirmek isteyen herhangi bir organizasyon tarafından uygulanabilir.

ISO 50001 standardı, enerji verimliliği ve enerji tüketimi azaltımı için bir çerçeve sağlar. Bu çerçeve, organizasyonların enerji yönetimleri için belirli adımların uygulanmasını gerektirir. Standart, enerji yönetimi sistemi planlamasından, uygulamasına ve performans ölçümüne kadar tüm aşamaları kapsar (Yıldırım 2022).

ISO 50001 standardının amacı, enerji yönetim sistemleri aracılığıyla enerji verimliliğini artırmak, enerji tüketimini azaltmak ve karbon ayak izini küçültmektir. Bu standardın uygulanması ile organizasyonlar, enerji tüketimlerini izleyebilir, enerji verimliliği ile ilgili hedefler belirleyebilir, enerji tüketimlerini azaltmak için eylem planları hazırlayabilir ve enerji yönetimi performanslarını izleyebilirler (Nalbur ve Yavaş 2023).

ISO 50001 standardı, enerji yönetim sistemi kurmak isteyen organizasyonlar için belirli adımları içerir. Bu adımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

2.3.1 Enerji Yönetim Sistemi Planlaması

Organizasyonun enerji performansını değerlendirmesi, enerji verimliliği hedeflerini belirlemesi ve enerji tüketimini azaltmak için eylem planları hazırlaması gerekmektedir.

2.3.2 Enerji Yönetim Sistemi Uygulaması

Enerji yönetim sistemi uygulanırken, organizasyonun enerji tüketimini izlemesi, enerji performansını ölçmesi ve enerji yönetim süreçlerini tanımlaması gerekmektedir.

2.3.3 Enerji Yönetim Sistemi Performansının İzlenmesi ve Değerlendirilmesi

Organizasyonun enerji performansı sürekli olarak izlenmeli ve ölçülmeli, performans hedefleri belirlenmeli ve performans sonuçları raporlanmalıdır.

Organizasyonun enerji yönetim sistemi, sürekli olarak iyileştirilmelidir. Bu, enerji performansının izlenmesi, enerji yönetimi hedeflerinin gözden geçirilmesi, enerji verimliliği eylem planlarının güncellenmesi ve organizasyonun enerji yönetimi sürekli olarak yeniden değerlendirilmesi anlamına gelir.

ISO 50001 standardı, organizasyonların enerji yönetim sistemlerinin etkililiğini artırmalarına yardımcı olmak için bir dizi gereksinim belirler. Bunlar arasında, organizasyonların enerji yönetim planlarının hazırlanması, enerji performans göstergelerinin belirlenmesi, enerji performansının ölçümü ve izlenmesi, enerji verimliliği eylem planlarının geliştirilmesi ve enerji yönetimi sisteminin sürekli olarak iyileştirilmesi yer almaktadır.

Bu standart sonuç olarak birçok avantaj sağlar. Bunlar arasında, enerji tüketiminde azalma, enerji faturalarında tasarruf, enerji verimliliği artışı, karbon ayak izinin küçülmesi, yasal düzenlemelere uyum ve müşteri beklentilerine cevap verme yeteneği yer alır. Ayrıca, enerji yönetimi sistemi kurmak ve uygulamak, organizasyonlara enerji verimliliği kültürünü benimsetmeleri için bir fırsat sağlar.

2.4 Enerji Yöneticisi

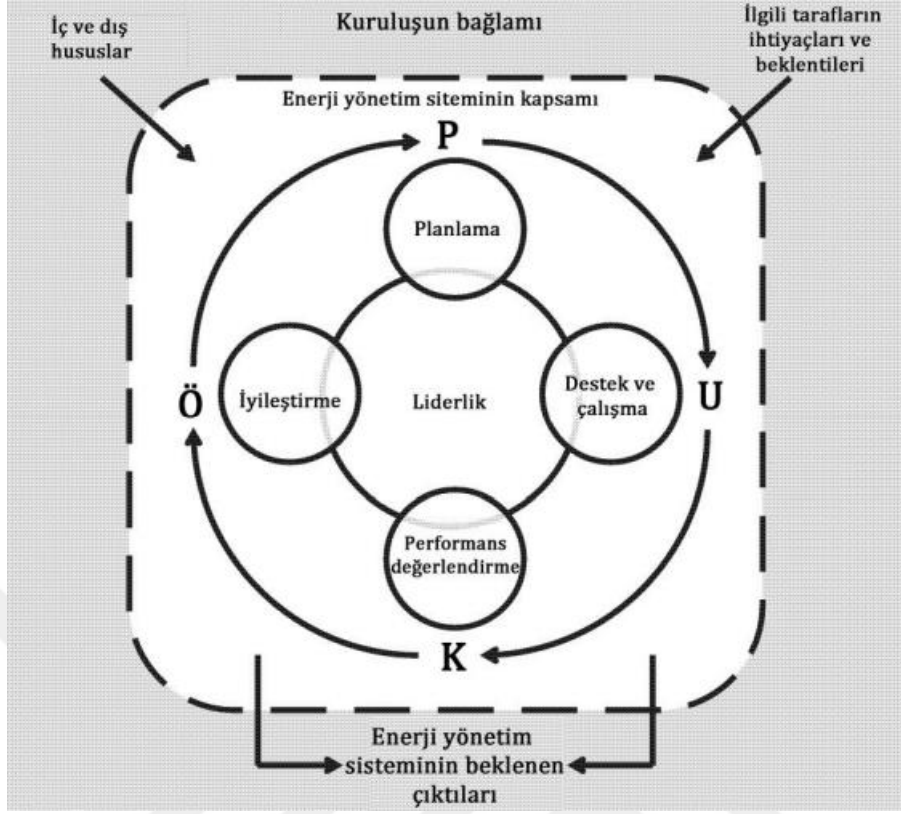
Ülkemizde enerji verimliliğine oldukça önem verilmektedir. Enerjinin yönetilmesi konusunda uzman yetkinliğe sahip kişilerin enerji yöneticisi eğitimlerini de alarak bakış açısını genişletmeleri ve 1000 TEP üzeri enerji tüketimi olan işletmelerde zorunlu olan enerji yöneticisi görevlerini yerine getirmesi oldukça önemlidir (Yıldırım 2022).

Her yıl mart ayında işletmeler Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na bildirmek üzere enerji kullanımlarını ve enerji yöneticilerini bildirmek durumundadır. Enerji yöneticileri bulundukları işletmeler adına enerji yönetim sistemi (EnYS), gerekliliklerinin belirlenmesini sağlar. Başarılı EnYS uygulaması, işletmenin tüm yapılarının özellikle üst yönetimin desteğini gerektiren bir enerji performansı artırma kültürünü destekler. Bu nedenle, EnYS'nin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, tüm kademelerin desteğine ve özellikle üst yönetimin bağlılığına ihtiyaç vardır. Bu sayede kuruluş enerji performansını iyileştirme yolunda daha etkili bir şekilde ilerleyebilir.

2.5 Enerji Yönetiminde PUKO Çevrimi

Enerji yönetimi bağlamında, PUKÖ yaklaşımı şu ana hatlarıyla özetlenebilir:

Planlama aşamasında, kuruluşun genel durumunu anlamak için çalışmalar yapılır. Bu çalışmalar arasında enerji politikasının oluşturulması, enerji yönetimi ekibinin kurulması ve risk ve fırsatların belirlenmesi yer alır. Ayrıca enerji gözden geçirmesi yapılır ve önemli enerji kullanımları (ÖEK) tespit edilir. Bu aşamada ayrıca enerji performans göstergeleri (EnPG) belirlenir ve enerji referans çizgileri (EnRÇ) oluşturulur. Hedefler belirlenir ve kuruluşun enerji politikasına uygun olarak enerji performansını iyileştiren faaliyet planları oluşturulur. Daha iyi anlaşılabilmesi adına puko çevrimi, Şekil 2.2'de incelenebilir.



Şekil 2.2 Puko çevrimi (Yıldırım 2022).

Uygulama adımında faaliyet planları, çalışma ve bakım kontrolleri, yetkinlik sağlanması, haberleşme, tasarım ve tedarikte enerji performansının ciddiye alınması gibi uygulamalar gerçekleştirilir.

Kontrol adımında EnYS ve enerji performansı takip edilir, ölçülür, analiz edilir, değerlendirilir, denetlenir ve yönetimin gözden geçirilmesi yapılır.

Önlem adımında uygun olmama durumları, EnYS ve enerji performansı'nın sürekli iyileştirilmesi adına önlemler alınır.

Bu yaklaşım, enerji yönetimi konusunda etkili bir çerçeve sunar ve kuruluşların enerji performansını artırmak için gerekli adımları belirleyerek sürekli iyileştirmelerini sağlar.

2.6 Termodinamik Yasaları

2.6.1 Termodinamiğin 1. Kanunu

Termodinamiğin 1. kanunu, enerjinin korunumu ilkesine dayanan bir prensiptir. Bu prensip, enerjinin hiçbir şekilde yok edilemeyeceği veya yaratılamayacağı, ancak bir formdan diğerine dönüştürülebileceği anlamına gelir. Bu prensibi daha spesifik bir şekilde ifade etmek gerekirse, bir termodinamik sistemin içindeki enerjinin toplamı sabittir. Bu, bir sisteme verilen ısı ve yapılan işin, sistemin içindeki enerji miktarının artmasıyla sonuçlanacağı anlamına gelir. Öte yandan, bir sistemden alınan ısı ve yapılan iş, sistemin içindeki enerji miktarının azalmasına neden olacaktır. Termodinamiğin 1. kanunu, enerjinin korunumu ilkesinin evrensel bir prensip olduğunu gösterir. Yani, evrendeki tüm enerjinin toplamı sabittir ve hiçbir şekilde yok edilemez veya yaratılamaz.

Bu prensip, enerjinin termodinamik sistemlerde nasıl işlediğini anlamamıza yardımcı olur. Örneğin, bir motorun çalışması sırasında yakılan yakıt, ısı enerjisine dönüştürülür ve bu enerji, motorun hareketi için yapılan işe dönüştürülür. Bu işlem sırasında enerji korunumu prensibi devrededir ve sistemin içindeki enerjinin toplamı sabit kalır. Termodinamiğin 1. kanunu aynı zamanda, enerjinin dönüşümü sırasında verimlilik kayıplarının olacağı gerçeğini de gösterir. Yani, bir sistemdeki enerjinin tamamı, sistemin içindeki enerjiye dönüştürülemez. Bu kayıplar genellikle ısı enerjisi olarak serbest bırakılır ve bu da birçok enerji dönüşümünde ısı kaybına neden olur. Sonuç olarak, termodinamiğin 1. kanunu, enerjinin korunumu prensibine dayanarak enerjinin dönüşümü sırasında meydana gelen değişimleri açıklar ve termodinamik sistemlerin nasıl çalıştığını anlamamıza yardımcı olur (Çamdalı 2012).

2.6.2 Termodinamiğin 2. Kanunu

Termodinamiğin 2. kanunu, termodinamiğin temel bir prensibidir ve doğanın en temel yasalarından biridir. Bu kanun, termodinamik sistemlerin ısı transferi, enerji dönüşümü ve entropi değişimleri hakkında birçok önemli bilgi sağlar. Termodinamiğin 2. kanunu, entropi artışı prensibi olarak da bilinir. Bu prensip, termodinamik sürecin yönünü belirler ve doğal süreçlerin hangi yönde gerçekleşebileceğini belirler.

Kanunun matematiksel ifadesi şöyledir:

$$\Delta S \geq \frac{Q}{T} \quad (2.1)$$

Burada, ΔS , sistemdeki entropi değişimidir; Q , sistemle etkileşime giren ısıdır ve T , sistem sıcaklığıdır. ΔS 'nin pozitif olması durumunda, sistemdeki entropi artar ve bu da kanunun ifadesinin doğru olduğunu gösterir. Bu kanun, iş ve ısı transferi arasındaki farkı da belirler. İş, düzenli hareketleri ifade ederken, ısı transferi rastgele moleküler hareketleri ifade eder. Bu nedenle, ısı transferi daha fazla entropi artışına neden olur. Bu kanun ayrıca, sıcaklık farkları nedeniyle ısı enerjisinin doğal olarak yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa hareket edeceğini belirtir. Bu, evrenin entropisinin sürekli arttığı anlamına gelir. Bu süreç, termodinamik olarak geri döndürülemezdir ve bu nedenle entropi artışı prensibi olarak adlandırılır.

Sistemin içindeki enerjinin tamamı faydalı işe dönüştürülemez. Bir kısmı, sistemin entropisini arttırmak gibi faydasız süreçlere harcanır. Entropi, bir sistemin dağılım derecesini ifade eder ve bu nedenle düzensizlik veya karmaşıklık ölçüsü olarak da bilinir. Bir sistemin entropisi arttıkça, iç düzeni ve organizasyonu bozulur ve sistemin kullanışlılığı azalır (Çamdalı 2012).

Bir örnek düşünelim, bir buhar türbini, buharın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür ve elektrik jeneratörünü çalıştırarak elektrik enerjisi üretir. Ancak, bu süreçte, buharın tamamı mekanik enerjiye dönüştürülemez. Buharın bir kısmı, türbinin pervanesinin çevresindeki hava ile etkileşerek titreşime neden olur ve bu titreşimler, sistemin içsel entropisini arttırır. Bu nedenle, enerjinin tamamı faydalı işe dönüştürülemez ve bir kısmı, sistem içindeki süreçlerin doğal sonucu olarak harcanır. Bu harcanan enerji, sistemin içsel bütünlüğünü korumak için gerekli olan entropi artışına katkıda bulunur. Sonuç olarak, termodinamiğin 2. kanunu, doğanın düzenli hareketini belirleyen önemli bir prensiptir. Bu kanun, entropi artışının sürekli ve geri döndürülemez olduğunu belirtir ve evrenin doğal olarak düzensizleştiği anlamına gelir.

2.7 Çalışmayla İlgili Literatür Bilgileri

Özdemir (2017), çalışma İstanbul'da olan bir doğalgaz yakıtlı gaz türbinine ait termodinamik yasaları olan 1. ve 2. yasaların uygulaması ile analiz gerçekleştirmiştir. Çalışmanın amacı, gaz türbini verimini artırmak için uygun çalışma koşullarını belirlemektir. Çalışma için kompresör giriş havası sıcaklığı 270 K ile 303 K aralığında değiştirilmiş ve kompresör basınç oranı farklı değerlerle kullanılarak türbin işinin yüzdesi hesaplanmıştır. Sonuçlara göre, kompresörün basınç oranı 10:1 olduğunda türbin işinin ortalama olarak %81,10'unu, 15:1 olduğunda ortalama %78'ini, 20:1 olduğunda ortalama %76'sını ve 25:1 olduğunda ortalama %75'ini kullanarak elde edilmiştir. İlgili gaz türbininde en üst ısı verim değerini kompresör basınç oranı 25:1 ve kompresör giriş sıcaklığı 270 K olduğunda %41 olarak belirlenmiştir. En düşük ısı verim değeri ise kompresör basıncı oranı 10:1 ve kompresör giriş havası sıcaklığı 303 K olduğunda %18,9 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, çalışmada vurgulanan bir diğer nokta, kompresör girişinde meydana gelen 33°C'lik sıcaklık artışının kompresör basıncını etkilediği ve 10:1 ve 25:1 kompresör basınç oranlarında %6 ve %4,8'lik bir ısı verim düşüşüne neden olduğudur. Bununla birlikte, yükselen basınç oranıyla bu düşüşün daha az kayıpla atlatıldığı ifade edilmiştir.

Kutbi ve Georgiou (2022), elektrik talebi, artan nüfus ve büyüyen ekonomi nedeniyle küresel olarak büyümekte, küresel enerji talebinin yılda %2,3 oranında artacağı öngörülmektedir. Elektrik üretmenin en güvenilir yollarından biri gaz türbinleri kullanmaktır. Gaz türbinleri elektrik üretimi açısından verimli olmasına rağmen, güç çıkışları, özellikle sıcaklığın 50°C'ye kadar ulaşabildiği yaz aylarında, sıcaklık değişimi nedeniyle yıl boyunca önemli ölçüde değişmektedir. Bunun nedeni, gaz türbinlerinin güç çıkışının, motordaki hava/yakıtın kütle akışıyla orantılı olmasıdır. Motordan geçen hacimsel hava akışı esasen sabit olduğundan, kütle akışı bu nedenle gaz türbininin kompresörüne giren havanın sıcaklığıyla birlikte değişir. Ortam sıcaklığı yüksek olduğunda, güç çıkışı ve verimlilik azalır. Böylece, gaz türbini giriş havasını soğutarak, türbin güç çıkışı önemli ölçüde artar ve verimliliği artar. Yanma havasını birkaç derece bile soğutmak, güç çıkışını önemli ölçüde artırabilir. Bunun nedeni, soğuk havanın daha yoğun olması ve bu nedenle türbine daha yüksek bir kütle akış hızı ve basınç oranı

vermesidir, bu da türbin çıkışının ve verimliliğinin Fahrenheit derecesi başına %0,5 veya santigrat derece başına yaklaşık %1'e kadar artmasına neden olur. Kojenerasyondaki bir diğer avantaj, daha fazla buhar üretimi ile sonuçlanan daha yüksek egzoz kütlesi akışlarıdır. Türbin giriş soğutması, nominal kapasitelerini artırmak ve NOx emisyonunu iyileştirmek için Saudi Aramco'nun türbinlerinin çoğuna monte edilebilir. Bu yazıda, türbin giriş soğutmasının arkasındaki mekanizma analiz edilecek ve Abu Safah ve Qatif tesis tesislerinin mevcut GE Frame VII gaz türbinleri üzerinde bir GHS sisteminin güçlendirilmesi için yürütülen tekno ekonomik bir çalışmanın sonuçları sunulmuştur.

Yıldız vd. (2016), elektrik enerjisi üretimi ve tüketimi arasındaki mesafe, iletim hatlarındaki enerji kayıplarına neden olabilir ve sonuç olarak enerji kaybı artar. Ancak, elektriği üretirken ve tüketirken aynı yere yerleştirilmiş işletmeler, bu kayıplardan etkilenmez ve daha verimli bir şekilde çalışabilirler. Belirtilen çalışmada, Kahramanmaraş'ta bir iplik fabrikası, yerinde üretimle elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için bir kojenerasyon tesisi kullanmaktadır. 2015 yılına ait üretim-tüketim verileri kullanılarak yapılan verim hesabı sonucunda, mevcut sistem veriminin %39 olduğu tespit edilmiştir. Ancak, yararlı ısının geri dönüşümü sağlandığında, sistem verimi %70'lere kadar yükselmiştir. Bu nedenle, kojenerasyon tesisi için yapılan hesaplamalar neticesinde, yararlı ısının geri kazanımı sağlanarak sistem daha etkin ve verimli bir şekilde çalıştırılabilir. Elektrik enerjisi üretimi ve tüketimi arasındaki mesafenin azaltılması, işletmelerin daha verimli bir şekilde çalışmasına yardımcı olabilir. Kojenerasyon gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak, enerji verimliliği artırılabilir ve enerji kaynaklarının daha etkili kullanılması sağlanabilir.

Dizaji ve Pourhedayat (2019), sıcak mevsimlerde gaz türbini enerji santrallerinin performansının düşürülmesi, uzmanları farklı giriş havası sıcaklığı düşürücü teknikleri önermeye ikna etmiştir. Türbinin egzozunda erişilebilir serbest ısı, absorpsiyonlu soğutucuyu potansiyel bir çözüm olarak haklı çıkarır. Bununla birlikte, mevcut araştırmaların değerlendirmelerine dayanarak, hemen hemen tüm iklim koşulları için, ISO koşuluna ulaşmak için büyük bir kapasite absorpsiyonlu soğutucu gereklidir, bu da önemli miktarda başlangıç, işletme ve bakım maliyeti anlamına gelir. M-çevrim soğutucu (çok daha basit bir yapıya ve daha düşük maliyetlere sahip) hava sıcaklığını herhangi bir

nem eklemekten çığlenme noktası sıcaklığına doğru düşürebildiğinden, mevcut araştırmalar söz konusu amaç için entegre bir M-döngüsü ve absorpsiyonlu soğutucu döngüsü önermektedir. Mevcut yeni döngüde, hava, soğurma işleminin geri kalanı için gerekli absorpsiyonlu soğutucu kapasitesini önemli ölçüde azaltan absorpsiyonlu soğutucuya girmeden önce M döngüsü ile çığlenme noktası sıcaklığına doğru önceden soğutulur. Entegre çevrimin en şaşırtıcı özelliği, soğurma işlemi sırasında absorpsiyonlu soğutucu ile havadan gelen yoğunlaşmış suyun, M-çevrim su tüketimi olarak kullanılabilmesidir. Bazı iklim koşulları için M-döngüsü, absorpsiyonlu soğutucuya ihtiyaç duymadan ISO koşulu sağlayabilir. Gerçek endüstriyel uygulamalarda kullanılabilecek diğer birçok olağanüstü sonuç elde edilir.

Kwon vd. (2018), gaz türbini ile ilgili kritik bir konu, artan ortam sıcaklığı ile gücünün önemli ölçüde azalmasıdır. Son zamanlarda, bir absorpsiyonlu soğutucu kullanarak, giriş havasının ve sıcak parça soğutma havasının aynı anda soğutulması yoluyla sıcak mevsimlerde gaz türbinlerinin güç çıkışını en üst düzeye çıkarmak önerilmiştir. Bu çalışma, bu kavramı genişletmeye hizmet etmekte ve en son gaz türbini modeli olan H sınıfı bir motor kullanan kombine çevrim santrallerine eşzamanlı soğutma uygulamaktadır. Soğutma sıvısı ön soğutması için iki yöntem karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve en iyi seçenek seçilmiştir. Önerilen çift soğutma, diğer geleneksel soğutma şemaları ve bunların kombinasyonları ile karşılaştırılmıştır. Bunlar arasında mekanik bir soğutucu veya absorpsiyonlu bir soğutucu kullanılarak basit giriş havası soğutması ve bu şemaların her birinin soğutma sıvısının ortam havası ile bağımsız olarak soğutulmasıyla kombinasyonu bulunur. En büyük kapasiteli ticari absorpsiyonlu soğutucuyu kullanarak soğutma sıvısı ön soğutma ve giriş havası soğutmasının maksimum derecelerinin sırasıyla 45 K ve 11 K olduğu tahmin edildi ve kombine çevrim tesisinin güç artışının % 8.2 olduğu tahmin edildi, bu da diğer herhangi bir şemayla elde edilenden daha büyüktü. Ekonomik bir analiz, ikili soğutma planının fizibilitesini doğruladı.

Akbari ve Mahmoudi (2014), çalışmada daha yüksek verimli bir güç döngüsü tasarlamak ve bu doğrultuda, süper kritik CO₂ güç döngüsü, diğer güç döngülerine göre daha yüksek bir verime sahiptir. Ancak, S-CO₂ güç döngüsü için uygun bir evaporatör tasarımı yapmak zordur. Bu nedenle, organik rankine döngüsünün evaporatörünü kullanarak bir

özüm önerisi sunmuşlardır. Çalışmanın sonuçları, organik rankine döngüsünün evaporatörünün S-CO₂ güç döngüsünde kullanılmasıyla, santralin veriminde belirgin %11,7 bir artış olduğunu göstermiştir. Yapılan analizlere göre, bir kombine çevrim santralinin verimleri I. ve II. yasalara göre sırası ile %32,8 ve %43,4 şeklinde belirlenmiştir. Ekserji ve enerji analizleri, tüm üniteler için ayrı şekilde uygulandığında, en yüksek ekserji yıkımının kazan, yanma odası ve yoğunlaştırıcı ünitelerde gerçekleştiğini, diğer ünitelerdeyse ekserji yıkımların daha düşük olduğunu ortaya koymuştur. Analiz sonuçları ayrıca, ekserji yıkımlarının azaltılmasıyla santraldeki verim artışının mümkün olabileceğini öngörmektedir.

Demiral (2019), bugün, üretim yerlerinde enerjinin etkili kullanımı, toplumlar için önemli bir kalkınma kriteri olarak kabul edilmektedir. Ancak, tüm enerji dönüştürme işlemlerinde faydalı enerjinin tamamı elde edilememektedir. Bu durum, enerji verimliliği çalışmalarının önemini artırmaktadır. Bu proje kapsamında, bir kısıtlama tahtası tesisindeki bir kojenerasyon ünitesinde yer alan 7 MW gaz türbini incelenerek enerji verimliliği çalışmaları yürütülmüştür. Çalışma sonucunda, gaz türbininin verimliliğini artırmak için hedefe yönelik iyileştirmeler yapılarak, gaz türbin giriş havasıyla panel odalarının emilim soğutucusuyla soğutulması yapılmıştır. Sistemin şu anki ve uygulama sonrasındaki verimlilikleri deneysel şekilde karşılaştırılmıştır. Projenin finansal tasarrufları yılda 289.367 TL olarak hesaplanmış ve geri dönüş süresi 1,9 yıl olarak belirlenmiştir. İlâveten, yönetim kurulu odalarında kullanılan soğutmaya gereken elektrik enerjisi tüketimi %77,8 azaltılmıştır. Gaz türbininin giriş havası soğutulması verimi %32,09'den %34,45 seviyesine yükseltilmiş ve yıl toplamında 2.459.199 kWh doğalgaz tüketimi azalmıştır. Giriş havasının daha da temiz ve şartlandırılmış olması nedeniyle, bakım masrafı da azaltılmıştır. Ayrıca, sıcak zamanlarda olan havalarda türbinin verim düşüşlerine izin vermeyerek üretim kesintileri ve kayıpları minimize edilmiştir.

Kareem (2023), organik Rankine Cycle (ORC) sistemleri, düşük dereceli termal enerjiyi elektriğe dönüştürmek için uygun bir yaklaşımdır. Ek olarak, ORC sistemleri, enerji dönüşüm sistemlerinin en yüksek döngüsü sırasında egzoz gazlarının atık ısısının atmosfere salınmasını önler. Bu çalışmanın temel amacı, Bağdat'ta bulunan Taji petrol istasyonunu rankine döngüsü ve organik rankine döngüsü ile entegre ederek ekstra

elektrik üretmek ve çevreye salınan emisyonları azaltmak için atık ısı geri kazanımını doğrulamaktır. Brayton çevrimi organik rankine çevriminin gaz-buhar kombine çevrim (GSO CC) sisteminin termodinamik ve eksergoekonomik değerlendirmesi, birinci ve ikinci yasa verimlilikleri üç objektif fonksiyon ve sistemin toplam maliyet oranları dikkate alınarak uygulanmıştır. Sonuçlara göre brayton çevrimi için optimum çalışma koşullarında 167,3 MW güç üretilirken, gaz-buhar kombine çevrim sisteminden 258,2 MW güç üretilmektedir. Toplam enerji ve ekserji verimlilikleri Brayton döngüsü için sırasıyla %28.74 ve %27.75, gaz-buhar kombine çevrim sistemi için ise sırasıyla %44.37 ve %42.87 olarak bulunmuştur. Ayrıca, gaz-buhar kombine çevrim sistemi 9.03 \$/MWh'ye mal olurken, BC'nin maliyeti 8.24 \$/MWh'dir. Sonuçlar ayrıca basınç oranı arttıkça gaz-buhar kombine çevrim sisteminin ağırlığının azaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, Gaz-Buhar kombine çevrim sisteminin verimliliği ve maliyetleri, artan basınç oranı ile maksimuma ulaşana kadar artar ve daha sonra basınç oranı daha da arttıkça azalır. Hava kompresörü ve gaz türbininin gaz türbini giriş sıcaklığındaki ve izentropik verimliliğindeki artış, sistemin termodinamik performansını artırır; ancak bu parametrelerdeki daha fazla artış toplam maliyet oranlarını artırmaktadır.

Al-Affas (2016), Irak'ta, elektrik enerjisi için en yüksek talep yaz günleri boyunca gerçekleşir ve yoğun olmayan talebin neredeyse iki katıdır. Ancak artan hava sıcaklıkları, yanma türbinlerinin performansını düşürerek talep profiline uygun değildir. Irak'ta üretilen yıllık enerjinin yaklaşık %55'i yanma türbinleriyle üretilir ve türbinler, yaz aylarındaki 50°C'ye kadar olan ortam hava sıcaklıkları nedeniyle kapasitelerinin %46'sına kadar düşer. Sabit hızda çalışan endüstriyel gaz türbinleri, sabit hacim akışlı yanma makineleridir. Spesifik hava hacmi sıcaklıkla doğru orantılıdır, bu nedenle hava yoğunluğundaki artış, hacimsel hız sabit olduğunda daha yüksek hava kütle akış hızına yol açar. Bu da gaz türbininin güç çıkışını artırır. Gaz türbinlerinde giriş havasını soğutmak, güç çıkışını artırmak için yararlı bir seçenektir. Kompresör giriş havası sıcaklığını azaltmak adına farklı yöntemler mevcuttur. Bu çalışmada, iki şekil soğutma sistemi incelenmiştir. İlk yöntem, gaz türbini yoğun sıcaklığını azaltmak için suyun dağılmasını sağlayan bir sistemdir. İkinci yöntem ise, bitkin kullanımı kullanan emilim soğutma sistemidir. Sıcak gazlar, kompresör hava alımını soğutmak için bir sıcaklık eşanjöründen geçirilir. Bu çalışmada, farklı kanal hava sıcaklığı ve ağırlık oranı

koşullarında güç verimini ve sıcak yeterliliğini hesaplamak için gaz türbini uygulamasının termodinamik muayenesi tamamlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, evaporatif soğutma sistemlerinin gücü artırabildiğini ve incelenen gaz türbini ünitesinin verimliliğini emilim soğutma bobin sisteminden daha ucuz bir şekilde artırabildiğini göstermektedir. Ancak, evaporatif soğutma sistemleri ıslak ampul sıcaklığı ile sınırlı bir soğutma potansiyeline sahiptirler. Öte yandan, absorpsiyon soğutucular, daha yüksek birim enerji maliyetleri ile yıllık enerji üretiminde en yüksek artışı sağlarlar.

Bolatturk vd. (2015), termik santraller, enerji üretiminin önemli bir bölümünü sağladığından, verimlerinin artırılması ve enerji kayıplarının en aza indirilmesi için yapılan iyileştirmeler büyük tasarruflar sağlayabilir. Bu uygulamaların enerji sorunlarına çözüm bulmak için faydalı olacağı tartışmasız bir gerçektir. Bu bağlamda, mevcut çalışmada Türkiye merkezli Çayırhan termik santralının ekserji ve termoekonomik analizleri yapılmıştır. Çalışmada, termik santraldeki her bir ünitenin termodinamik özellikleri, EES paket programı kullanılarak giriş ve çıkış noktaları temel alınarak belirlenmiştir. Çıkarım yapılan termodinamik özelliklerle, termik santral ısı verimi %38, ikinci yasa verimi %53 olarak hesaplanmıştır. Termik santralin üst ekserji kaybı, türbin grupları, kazan, kondenser, pompa grubu, ve ısıtıcılar gibi bileşenlerde gözlemlenmektedir. Ekserji kaybı maliyetlerine gelindiğinde ise, en yüksek maliyetler sırasıyla kazan, türbin grupları ve kondenserde görülmektedir. Ekserji-ekonomik etmenler araştırıldığında, en üst etmen türbin gruplarında ölçülmüştür. Bunu sırası ile kazan ve kondenser tahliye pompası takip etmektedir. Bu analizler, Çayırhan termik santralının enerji verimliliğini artırmak ve kayıpları azaltmak için potansiyel iyileştirme alanlarını belirlemeye yardımcı olmaktadır. Bu şekilde, enerji kaynaklarının daha etkin kullanılması ve maliyetlerin azaltılması hedeflenmektedir.

Karaali ve Öztürk (2017), ortam koşullarının kojenerasyon döngülerinin performansı üzerindeki etkileri, ekserji analiz yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu döngüler arasında basit döngü, hava ön ısıtma döngüsü, hava yakıtlı ön ısıtma döngüsü ve giriş hava soğutma döngüsü yer almaktadır. Döngüler, farklı hava ve yakıt kütle oranlarına göre termodinamik olarak değerlendirilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. Elektrik enerjisi üretimi için, kompresörün giriş hava sıcaklığını 25°C'den 0°C'ye düşürerek

yaklaşık %10-15 artış sağlanabilir. Bununla birlikte, termal güç %10 azalır ve giriş hava sıcaklığı düşer. Yaz aylarında, elektrik gücü %2-7 arttırılabilir ancak bunun için kompresör giriş havasına su enjekte edilmelidir. Kompresör giriş havası basıncını 101.3 kilopascaldan 70.18 kilopascal'a düşürerek döngülerin eksergetik verimliliği %11-13 azalır. Ancak, bu değişiklik elektrik enerjisi üretimini yaklaşık %25 azaltır. Hava yakıtlı önceden ısıtılmış döngü, en yüksek ekserji verimliliğini sağlar. Basit döngü ise, yüksek ısı hızı ve ısı ekserjisi elde etmek için dört döngü arasında en iyisidir. Tüm ortam koşullarının bu döngüler üzerindeki etkileri aynı anda dikkate alınarak analiz edilmiş ve bu çalışmada birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Al-Fahed vd. (2009), yükseltilmiş giriş havası sıcaklığının ve bağıl nemin bir gaz türbini (GT) kojenerasyon sistemi performansı üzerindeki etkisi araştırıldı. Analiz, çift basınçlı ısı geri kazanımlı buhar jeneratörü (HRSG) ile entegre ISO koşulunda 171 MW kapasiteli bir GT üzerinde gerçekleştirilmiş, kojenerasyon sistemi Kuveyt yaz iklimi koşullarında test edilmiştir. Hesaplamalı bir model geliştirilmiş ve çift basınçlı GT-HRSG sisteminin performansını araştırmak için mühendislik denklemi çözücü profesyonel paketi kullanılarak çözüldü. Önerilen HRSG, bir enerji üretim buhar türbini çevrimini çalıştırmak için 150 bar ve 510°C'de yüksek basınçlı aşırı ısıtılmış buhar ve bir termal buhar sıkıştırma tuzdan arındırma sistemini çalıştırmak için 15 bar'da orta basınçlı doymuş buhar üretebilir. Bu çalışmada, önerilen kojenerasyon sisteminin enerji değerlendirmesi üzerindeki yüksek giriş havası sıcaklığı ve bağıl nemin etkisi kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Sonuçlar, GT'nin yüksek giriş havası sıcaklıkları altında çalıştırılmasının, düşük net güç ve termal verimlilik değerleri ile karakterize edildiğini göstermiştir. Yükseltilmiş giriş havası sıcaklıklarında, artan bağıl nem, GT çevrimi net gücü ve termal verimlilik üzerinde küçük bir pozitif etkiye sahiptir. Güç üretimi ve süreç ısısı için buhar üretmek üzere GT'yi HRSG ile entegre etmek, yüksek giriş havası sıcaklıklarında sistemin enerji kullanım faktörünü artırma eğilimindedir. Artan giriş havası sıcaklığı, güç/ısı oranı üzerinde olumsuz bir etkiye sahipken, bağıl nemin güç/ısı oranı üzerinde herhangi bir etkisi yoktur.

Yılmazoğlu ve Rahim (2010), bu çalışmada, 180 Megawatt elektrik üretimi yapan bir gaz çevrimi santralının en uygun sistem ve çevrim yapısı incelenmiş ve çevrimin tasarım analizleri yapılmıştır. İlgili santral Ankara'daki topoğrafik ve metrolojik şartları, işletmenin varsayılan olarak Ankara ve Adana'da gerçekleştiği senaryolarla kıyaslanmıştır. Kompresör girişinde nemli ve pratik çalışma senaryoları kıyaslanmıştır. Santrale nem uygulamasıyla kazanılacak en büyük kazanç, Adana'da görülmüştür. Geri dönüş süreleri ise, Adana ve Ankara için sırasıyla 81 gün ve 248 gün olarak bulunmuştur. Bu sonuçlardan, kompresörün hava girişi nemini daha üst seviyede olduğu çalışma şartlarında nemlendirme uygulamasının daha fazla ekonomik olduğu görülmüştür. Giren havadaki yaklaşık 10 °C azalış %8 verim artışı ve 300 m rakım artışı %3,5 kayıp olurken, Ankara ve Adana illeri bu iki etmenle ancak eş güçte üretim yapabilmektedir. Nemlendirme sistemi, merkezin tüketimine büyük etkisi vardır ve bununla birlikte Ankara'daki alçak bağıl nemli hava doyum sınırına ulaşana değin sistem çalışmaya devam edecektir. Adana'da nemlendirme sisteminin iç tüketiminin düşük olması ve elektrik üretiminin yakıt tüketimine oranının düşük olmasıyla sistem geri dönüş süresi, Adana koşullarında daha kısa bulunmuştur.

Ünver ve Kılıç (2005), farklı ortam sıcaklıklarında doğal gaz yakıtlı bir kombine çevrim santralının termodinamiğe dayalı bir analizi yapılmıştır. Birinci ve ikinci kanunlar çerçevesinde performans parametreleri incelenmiş ve her bileşen için tersinir güç, faydalı güç, ve tersinmezlik değerleri hesaplanmıştır. Tesisin genel verimleri de hesaplanarak değişimleri ve büyüklükleri incelenmiştir. 42°C'lik bir artışla çevre sıcaklığındaki değişimler hesaplanmıştır ve tesisin toplam birinci ve ikinci yasa verimleri sırasıyla yaklaşık %4 ve %5 oranında azalmaktadır. Ayrıca, çevre sıcaklığının 0°C'den yaklaşık 42°C'ye çıkarılmasıyla, sistemdeki tersinir iş ve güç çıkışı yaklaşık %22 azalmış, özgül yakıt tüketimi ise yaklaşık %9 artmıştır.

Çetin (2017), basit brayton döngüsü kullanılarak elektrik üretimi maliyeti parametrik analizi yapılmıştır. Farklı kompresör basınç oranları, ortam sıcaklıkları, gaz türbini izentropik verimlilikleri ve kompresör izentropik verimlilikleri altında maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Diğer değişkenlerin sabit olduğu varsayılmıştır. Analiz, termodinamik ve ekonomik ifadelerin bu değişkenlerin işlevi olarak formüle edilmesiyle

gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen model çözülerek, minimum elektrik üretim maliyeti veren optimum koşullar belirlenmiştir. Basit brayton döngüsü için iki optimum kompresör basınç oranı belirlenmiştir: biri gücü en üst düzeye çıkarırken, diğeri etkinliği teknik olarak en üst düzeye çıkarır. Verimlilik için optimum kompresör basınç oranı, güç için optimum kompresör basınç oranından her zaman daha yüksektir. Elektrik üretimini en aza indiren optimum ekonomik değerler teknik değerlerden farklıdır. Bu nedenle, tekno-ekonomik olarak optimum kompresör basınç oranı, bu teknik değerler arasında seçilmelidir. Kompresörün giriş havası sıcaklığı düştüğünde, elektrik üretim maliyeti de düşüş göstermektedir. Bu nedenle, sıcak yerlerde kompresör giriş havasının soğutulması ciddi avantajlar sağlayabilir. Ancak, bu avantajlarla birlikte ekstra bazı yatırım ve işletme masrafı da ortaya çıkacaktır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda belirtilen ekstra masrafların dikkate alındığı farklı çözümler geliştirilebilir. Bu çalışma, başka çalışmalar adına referans kaynağı olacak şekilde kullanılabilir.

Erdem (2009), evaporatif teknikle gaz türbini giriş havası soğutmasının iş çıkışı ve termal uç ekserji verimliliği üzerindeki artış sağladığı analiz edilmiştir. Bu analizler, atmosferik hava koşullarından bağımsız olarak sabit olan birim hacimsel akış başına gerçekleştirilir. Ayrıca evaporatif soğutmanın ekonomik analizi için basit ve etkili bir model geliştirilmiştir. Bir vaka çalışması olarak, Türkiye'deki sekiz farklı bölge için iki farklı gaz türbini modelinin geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. Teknik, ekonomik ve çevresel koşullara bağlı olarak, düşünülen bölgeler için evaporatif soğutma uygun olabilir.

Farzaneh-Gord ve Deymi-Dashtebayaz (2009), gaz türbini verimliliğini artırmayı amaçlayan türbin hava girişi soğutması için ticari olarak temin edilebilen çeşitli yöntemler vardır. Bu çalışmada, bir gaz türbininin performansını iyileştirmek için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Yaklaşım, Khangiran rafinerisi gaz türbinlerinden birine uygulanmıştır. Fikir, rafineri doğal gaz basınç düşürme istasyonunun potansiyel soğutma kapasitesi ile gaz türbininin giriş havasını soğutmaktır. Çalışma, Khangiran gaz rafinerisinin gaz türbinlerinin performansını artırmayı amaçlayan kapsamlı bir programın parçasıdır. Sonuçlar, gaz türbini giriş hava sıcaklığının 4–25 K aralığında azaltılabileceğini ve performansın yaklaşık 10 ay boyunca %1,5–5 aralığında iyileştirilebileceğini göstermektedir.

Karaali ve Keven (2022), elektrik enerjisi kullanımı, hayatımızda ve dünyada giderek artmakta ve bu artış ile birlikte elektrik kayıpları da kaçınılmaz hale gelmektedir. Bağlantı hatlarında yaklaşık %11 oranında kayıp yaşanmaktadır. Elektrik enerjisi, bağlantı hatlarındaki kayıpları azaltmak için alternatif çözümler sunmaktadır. Bu bağlamda, elektrik ve ısı enerjisi bir kojenerasyon sistemi içerisinde üretilerek yakıt kullanımında daha fazla verim elde edilebilmekte ve bu da enerji maliyetlerinin azaltılmasına olanak tanımaktadır. Kojenerasyon sistemlerinde, kompresöre giren havanın soğutulması ve egzoz gazlarının ısı enerjisinden soğutma yapılması için absorpsiyonlu soğutma sistemi kullanılır. Bu çalışmada, sistem ekserji analizi yöntemi ve termodinamiğin 1. ve 2. kanunları kullanılarak analiz edilmiştir. Isı enerjisinin bir kısmı havanın soğutulması için kullanılırken geri kalan ısı, buhar üretimi için kullanılmaktadır. Tüm çevrim ve cihazların performans analizleri yapılmış ve tartışılmıştır. Ayrıca, cihazların ekserji kayıpları, ekserji verimleri ve diğer performans parametreleri de hesaplanmış ve değerlendirilmiştir. Absorpsiyonlu soğutma sisteminin temel çevrimden daha iyi elektriksel verim sağladığı gösterilmiştir. Ancak, absorpsiyonlu soğutma sistemi nedeniyle ekserji verimi temel çevrimden biraz daha düşüktür. Absorpsiyonlu soğutma kojenerasyon sistemi, buhar talebi azaldığında veya elektrik talebi arttığında daha fazla elektrik üretimi için kullanılabilir.

Effiom vd. (2019), bir gaz türbininin nominal güç çıkışı, derecelendirme koşullarından farklı ortam koşullarında çalıştığında gerçekleşmez. Muhtemelen bu konuda en önemli ortam koşulu, gaz türbini performansında buna atfedilebilecek önemli kayıplara sahip sıcaklıktır, bu nedenle sıcak iklimlerde gaz türbini giriş havası soğutmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yazıda, Nijerya'daki bir gaz türbini tesisinden elde edilen işletme verileri, gaz türbini güç çıkışının ortam sıcaklığı ile değişimini belirlemek için kullanılmıştır. Ayrıca, giriş havası sıcaklığını azaltmak için uygun bir mekanik soğutucunun tekno-ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. ISO standart sıcaklığının üzerindeki ortam hava sıcaklığındaki her 1°C artış için, gaz türbini güç çıkışının %0,94 oranında düştüğü bulunmuştur. Gaz türbininin mekanik bir soğutucu ile güçlendirilmesi, sistemin üç yıldan kısa bir sürede kendini amorti etme kabiliyeti de dahil olmak üzere önemli finansal kazanımlarla güç çıkışını potansiyel olarak %20'ye kadar artırabilir. Ayrıca, mekanik chiller kurulumunun karlı olabilmesi için sermaye harcamalarının üst

sınırı belirlenmiştir. Bu nedenle, Nijerya'daki gaz türbini tesislerinin mevcut güç kapasitesini, giriş havasının mekanik olarak soğutulması yoluyla genişletmek için ekonomik olarak uygun bir durum vardır.

Kakaras vd. (2004), gaz türbini tesislerinin ürettiği güç ve verim giriş havasının sıcaklığına bağlıdır. Yüksek ortam sıcaklıklarında, ISO standart koşullarına (15°C) kıyasla özgül yakıt tüketiminde önemli bir artışla birlikte %20'den fazla bir güç kaybı gözlemlenebilir Bu çalışmanın amacı, gaz türbini tesislerinde giriş havası sıcaklığını azaltmak için yenilikçi bir teknolojinin entegrasyonunun bilgisayar simülasyonunu sunmaktır. Hava soğutma sisteminin açıklamasının ardından, iki test durumu için simülasyon sonuçları sunulmaktadır: basit çevrimli bir gaz türbini ve bir kombine çevrimli tesis. İlk olarak, ortam hava sıcaklığı değişiminin güç çıkışı ve verimlilik üzerindeki etkisi her iki durum için sunulmuştur. Daha sonra, evaporatif bir soğutucunun ve hava soğutma sisteminin entegrasyonundan elde edilen sonuçlar sunulmakta ve tartışılmakta ve elde edilebilecek güç çıkışı ve verimlilik kazanımı gösterilmektedir.

Agbadede (2021), ağır hizmet tipi bir endüstriyel gaz türbininde giriş sisleme uygulamasının performansını ve ekonomik faydalarını araştırmaktadır. Çalışmanın amacına ulaşmak için, bir gaz türbini performans yazılımı olan GasTurb kullanılarak ağır hizmet tipi bir endüstriyel gaz türbin motoru modellenmiştir. Modellenen motor, Frame 9E sınıfı gaz türbinlerinden türetilmiştir. Motor modellemesinin tamamlanmasının ardından, Nijerya'nın Nijer Deltası bölgesindeki bir yerden elde edilen ortam sıcaklığı profili verileri, motor performansı üzerindeki etkisini simüle etmek için motor modeline girdi olarak kullanıldı. Hava giriş sıcaklığını 10 santigrat derece düşürmek ve soğutmak için %0.4'lük bir su-hava oranı girilerek endüstriyel gaz türbininde giriş sisleme simüle edildi. Simülasyon grafikleri, artan ortam sıcaklığının bir sonucu olarak düşen gaz türbini performansının, giriş sisleme uygulamasıyla arttığını göstermektedir. Ekonomik analiz, giriş sisleme sistemi kullanıldığında bir yılda yaklaşık 2,4 milyon \$ kâr kaydedildiğini gösteriyor.

Ashley ve Sarim (2011), bir gaz türbini tarafından üretilen gerçek güç ile gaz türbini üzerinde etiketlenen tasarım anma gücü arasındaki fark, bir gaz türbini öngörülen ISO koşullarından farklı olan saha ortam koşullarında çalıştığında gözlemlenir. Ayrıntılı bir çalışma ve kapsamlı veri kaydı, ortam sıcaklığı ile gaz türbini güç çıkışının değer kaybı arasında iyi bilinen doğrudan bir ilişkinin varlığını onaylamıştır. Makale, gaz türbininin ISO koşullarından farklı olan ortam sıcaklığı gibi saha ortam koşullarına maruz kaldığında güç üretme yeteneği arasında ampirik bir ilişki önermektedir. ISO koşullarının üzerindeki ortam sıcaklığındaki her K artışı için gaz türbini termal verimlilik açısından %0,1 ve Brüt (yararlı) Güç Çıkışından 1,47 MW kaybeder. Kurulan bu ilişki, Gaz Türbini Giriş Havası Soğutma teknolojilerinin uygulamasını hızla geliştiren Orta Doğu ülkelerine özel referansla, kurulum planlaması ve tahmini için yerel elektrik üretiminin uygun şekilde değerlendirilmesine yardımcı olacaktır.

Kamal vd. (2017), bir gaz türbininin performansı ortam hava sıcaklığına bağlıdır. Gaz türbininin güç çıkışı azalır ve daha yüksek hava sıcaklığının bir sonucu olarak ısı oranı artar. Yüksek ortam hava sıcaklığına sahip Malezya'daki sıcak ve nemli iklim, gaz türbinli jeneratörlerin performansı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Türbin giriş havası soğutma, gaz türbinleri için türbin giriş hava sıcaklığını düşüren ve böylece makinenin güç çıkışını ve ısı oranını iyileştiren bir güç artırma teknolojisidir. Bu makalede, elektrikli soğutucular kullanılarak türbin giriş havası soğutmanın LM6000PD Gaz Türbini Jeneratörünün (43,5 MW ISO derecesi) performansı üzerindeki etkisi Malezya iklimi bağlamında değerlendirilmektedir. GT Pro yazılımı, ortam hava sıcaklığı 12°C'ye soğutulmuş gaz türbini jeneratörünün performansını değerlendirmek için kullanılır. Soğutucuların boyutlandırılması için kullanılan ortam tasarım noktaları, ASHRAE tarafından yayınlanan Sitiawan, Perak için %0,4 Evaporatif (Tasarım Noktası A) ve %0,4 Soğutma (Tasarım Noktası B) tasarım noktalarıdır. Tasarım Noktası A'nın, bir yıldaki çalışma saatlerinin yaklaşık %98'i için türbin giriş havası soğutma sisteminin soğutma talebini karşılamaya yeterli olan 1950 RT'lik bir soğutma grubu kapasitesiyle sonuçlandığı, Tasarım Noktası B'nin ise daha küçük bir soğutma grubu boyutu sağladığı gözlemlenmiştir. Yıllık çalışma saatlerinin yaklaşık %72'si için türbin giriş havası soğutma ihtiyacını karşılayabilen 1700RT. Gaz Türbini performansı açısından, Tasarım Noktaları A ve B için sırasıyla net güç çıkışı %27,5 ve %32,11 artarken net ısı oranı %2,8

ve %3,74 azaltıldı.

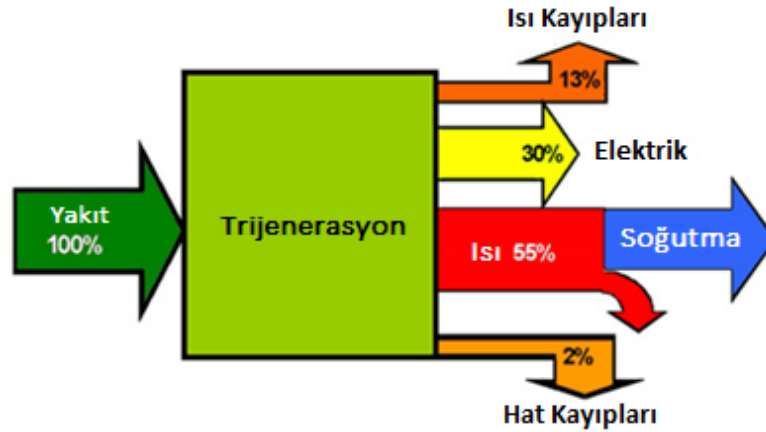
Ibrahim vd. (2012), bir gaz türbininin performansı esas olarak giriş havasının sıcaklığına bağlıdır. Bir gaz türbininin güç çıkışı, içindeki kütle akışına bağlıdır. Havanın daha az yoğun olduğu sıcak günlerde güç çıkışının düşmesinin nedeni tam olarak budur. Giriş havasının sıcaklığındaki 1°C'lik artış, güç çıkışını %1 azaltır. Bu yazının amacı, gaz türbinine giren havayı soğutmak için geliştirilmiş güncel teknikleri gözden geçirmektir. Mekanik soğutucular, ortam tipi evaporatif soğutucular ve absorpsiyonlu soğutucular gibi teknikler gözden geçirilmiştir. Gaz türbininin net güç çıkışını azalttığı için soğuk giriş havasının güç tüketiminin önemli olduğu bulunmuştur. Ayrıca mekanik soğutma grubu yardımcı güç tüketimi medya tipi evaporatif soğutuculara göre çok yüksektir. Ayrıca, gözden geçirilen çalışmalar, evaporatif soğutucunun verimliliğinin büyük ölçüde havada bulunan neme bağlı olduğunu ortaya çıkardı. Giriş havası soğutma yoluyla gaz türbini gücünün artırılması, genellikle en yüksek güç üretimiyle eşzamanlı olarak yüksek ortam sıcaklığında gücü artırmak için etkili bir şekilde kullanılır ve gaz türbini güç çıkışının dengelenmesine olanak tanır.

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Materyal

3.1.1 Trijenerasyon Santralleri

Trijenerasyon santralleri, enerji üretimi için kullanılan en verimli sistemlerden biridir. Bu sistemler, aynı anda elektrik, sıcak su, buhar ve soğutma üretmek için tasarlanmıştır. Şekil 3.1’de görüldüğü üzere tek yakıt girdisiyle birden fazla enerji formu üretilebilir. Bu dört farklı enerji formu, enerji ihtiyacının farklı yönleri için kullanılabilir. Örneğin, elektrik enerjisi bina aydınlatması, elektronik cihazlar ve motorlu araçlar için kullanılırken, sıcak su ve buhar enerjisi, endüstriyel işlemler, ısıtma ve soğutma amaçları için kullanılabilir. Trijenerasyon santralleri, doğal gaz gibi fosil yakıtlarla çalışır. Fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan ısı, bir gaz türbininde kullanılır. Gaz türbini, yüksek hızlı gaz akışını kullanarak, bir jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisi üretir. Bu işlem, sıcak gazların bir buhar türbinine doğru yönlendirilmesiyle devam eder. Buhar türbini, buharı kullanarak bir jeneratörle daha fazla elektrik enerjisi üretir (Kandemir 2019).



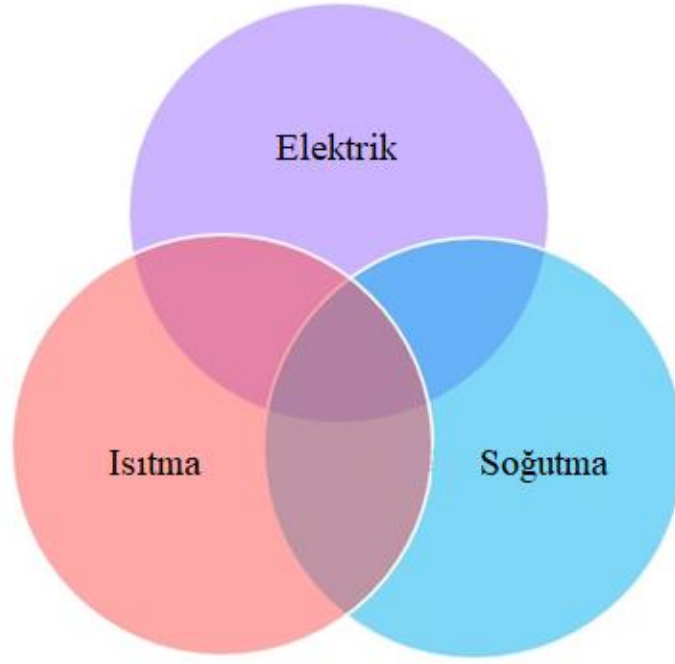
Şekil 3.1 Trijenerasyon diyagramı (İnt.Kyn.2).

Trijenerasyon santrallerinin en önemli özelliklerinden biri, soğutma için kullanılan suyun geri kazanılmasıdır. Bu sistem, soğutma kulesi, soğutma suyu dolaşım sistemi ve absorpsiyon soğutma sistemi olmak üzere üç ana bileşenden oluşur. Soğutma kulesi, sıcak suyun soğutulduğu bir yapıdır. Soğutma suyu dolaşım sistemi, soğutma kulesindeki

suyun dolaştığı bir sistemdir. Absorpsiyon soğutma sistemi ise, soğutma suyunun, gaz türbininde kullanılan doğal gazın yanma ürünü olan sıcak gazlar tarafından ısıtılması sonucu soğutulması işlemidir.

Trijenerasyon santrallerinin bir diğer avantajı, yüksek enerji verimliliğidir. Bu santraller, fosil yakıtların yakılması sonucu ortaya çıkan ısıyı kullanarak aynı anda Şekil 3.2’de görüldüğü üzere üç farklı enerji formu üretirler. Bu sayede, enerji kaynaklarının daha etkili bir şekilde kullanılması sağlanır. Ayrıca, trijenerasyon santralleri, enerji maliyetlerini düşürür ve çevreye daha az zarar verir. Trijenerasyon santralleri, çeşitli endüstrilerde ve ticari binalarda kullanılır. Bu santraller, birçok farklı amaç için kullanılabilen enerji kaynakları sağlar. Örneğin, sıcak su ve buhar enerjisi, ısıtma ve soğutma amaçları için kullanılabilirken, elektrik enerjisi elektrikli araçlar, aydınlatma ve elektronik cihazlar için kullanılabilir.

Trijenerasyon santralleri, enerji ihtiyacının daha verimli bir şekilde karşılanmasına yardımcı olurken, enerji maliyetlerini düşürerek işletmelerin tasarruf etmesine de yardımcı olur. Bununla birlikte, trijenerasyon santrallerinin bazı dezavantajları da vardır. Özellikle, fosil yakıtların kullanılması nedeniyle, bu santrallerin çevresel etkisi vardır. Fosil yakıtların yanması, karbon emisyonlarının artmasına neden olur ve atmosferdeki sera gazlarının yoğunluğunu artırarak iklim değişikliğine yol açabilir. Bu nedenle, trijenerasyon santralleri gibi fosil yakıtların kullanıldığı enerji üretim sistemleri, sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçiş sürecinde önemli bir araç olmasına rağmen, çevre dostu alternatiflere geçiş için çabaların artırılması gerekmektedir. Açıkçası, trijenerasyon santralleri, enerji verimliliği ve esnekliği açısından önemli bir role sahiptir. Aynı anda dört farklı enerji formu üretebildikleri için, endüstriyel işlemlerden ticari binalara kadar birçok farklı alan için kullanılabilirler. Ancak, fosil yakıtların kullanımı nedeniyle, çevre dostu alternatiflerin yaygınlaşması için çabaların artırılması gerekmektedir.



Şekil 3.2 Trijenerasyon santralleri çıktıları (İnt.kyn.3).

Trijenerasyon santralleri temel olarak aşağıdaki bileşenlerden oluşur.

- Gaz Türbini
- Jeneratör
- Transformatörler
- Atık Isı Kazanları
- Ekonomizer
- Absorbsiyonlu Chiller

3.1.2 Jeneratörler

Dinamo olarak da adlandırılan elektrik jeneratörü, mekanik enerjiyi elektrik hatları üzerinden yerel, ticari ve endüstriyel müşterilere iletmek ve dağıtmak için elektriğe dönüştüren cihazlardır. Jeneratörler ayrıca otomobiller, uçaklar, gemiler ve trenler için gerekli olan elektrik enerjisini de üretirler. Bir elektrik jeneratörü için mekanik güç genellikle dönen bir şafttan elde edilir ve şaft torkunun dönme veya açısal hız ile çarpımına eşittir. Mekanik güç birkaç kaynaktan gelebilir, hidrolik barajlardaki veya

şelalelerdeki türbinler; rüzgâr türbinleri, fosil yakıtların yanmasından veya nükleer fizyondan elde edilen ısı ile üretilen buharı kullanan buhar türbinleri; doğrudan türbinde gaz yakan gaz türbinleri, veya benzinli ve dizel motorlar. Jeneratörün yapısı ve hızı, mekanik çekicinin özelliklerine bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir.

Elektrik güç şebekelerini beslemek için kullanılan hemen hemen tüm jeneratörler, polariteyi sabit bir frekansta tersine çeviren alternatif akım (genellikle saniyede 50 veya 60 Hertz) çok sayıda jeneratör bir güç şebekesine bağlı olduğundan, eş zamanlı üretim için aynı frekansta çalışmaları gerekir. Bu nedenle onlar senkron jeneratörler veya bazı durumlarda alternatörler olarak bilinirler.

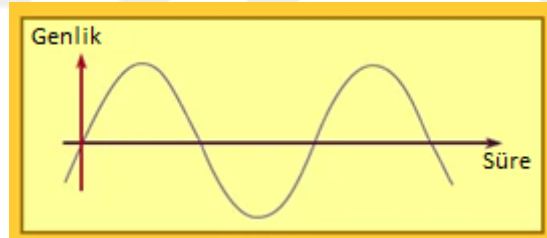
Bir alternatör veya senkron jeneratör, elektromanyetik indüksiyon prensibi üzerinde çalışır, yani bir iletkeni birbirine bağlayan akı değiştiğinde, iletkende bir EMF indüklenir. Alternatörün armatür sargısı dönen manyetik alana maruz kaldığında, voltaj armatür sargısında üretilir. Alternatörün rotor alan sargısına DC uyarıcıdan enerji verildiğinde, rotor üzerinde alternatif N ve S kutupları geliştirilir. Rotor bir ana taşıyıcı tarafından saat yönünün tersine döndürüldüğünde, stator üzerine yerleştirilen armatür iletkenleri, rotor kutuplarının manyetik alanı tarafından kesilir. Sonuç olarak, elektromanyetik indüksiyon nedeniyle EMF, armatür iletkenlerinde indüklenir. Bu indüklenen EMF dönüşümlüdür, çünkü rotorun N ve S kutupları armatür iletkenlerini alternatif olarak geçer (Uçmaz 2008).

Üretilen EMF'nin yönü Fleming'in doğru kuralı tarafından belirlenebilir ve bunun sıklığı şu şekilde verilir:

$$f = \frac{Ns \cdot P}{120} \quad (3.1)$$

3.1.2.1 Senkron Jeneratörler

Seçilmesinin önemli bir nedeni güç ağları için alternatif akım, zamanla sürekli değişiminin transformatörlerin kullanımına izin vermesidir. Şebeke hatlarında üretilen elektrik enerjinin verilebilmesi için şebeke ile aynı frekansta olabilmek gerekmektedir. Bu sebeple şebekeyi besleyebilmek için senkron jeneratörler ile elektrik üretilmesi gerekmektedir. Şebekeye senkron olabilmek için gerilim, frekans ve faz açısı eşit olmalıdır. Transformatörler, üretilen voltaj ve akım ne olursa olsun, elektrik gücünü uzun mesafeli iletim için yüksek voltaj ve düşük akıma dönüştürür ve ardından her bir tüketici için uygun düşük voltaja (ev hizmetleri için tipik olarak 120 veya 240 volt) dönüştürür. Kullanılan alternatif akımın özel biçimi, Şekil 3.3'de gösterilen şekle sahip sinüs dalgası. Bu, zaman içinde birbirinden yer değiştiren iki dalganın toplanıp çıkarılabileceği ve sonuç olarak aynı şeklin meydana geldiği tek tekrarlı şekil olduğu için seçilmiştir. İdeal olan, sinüs şeklindeki tüm gerilimlere ve akımlara sahip olmaktır. Senkron jeneratör, bu şekli pratik olduğu kadar doğru bir şekilde üretmek için tasarlanmıştır. Bu tür bir jeneratörün ana bileşenleri ve özellikleri aşağıda açıklandığı için bu daha iyi anlaşılacaktır.

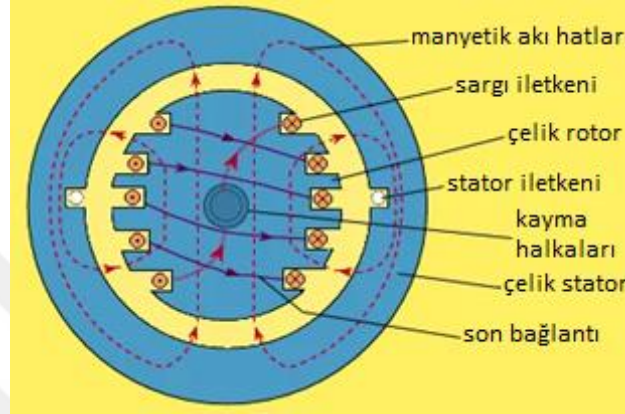


Şekil 3.3 Sinüs dalgası (İnt.kyn.4).

3.1.2.2 Rotor

Alternatörün rotoru, ayrı bir DC kaynağı (uyarıcı olarak da adlandırılır) tarafından iki kontak halkasından doğru akımla beslenen alan sargısını taşır. Uyarıcı genellikle alternatörün şaftına monte edilmiş küçük bir DC şönt jeneratörüdür. Alternatör için iki tip rotor konstrüksiyonu kullanılır: çıkık kutuplu ve silindirik rotor tipi. Şekil 3.4'de temel bir senkron jeneratörün enine kesiti gösterilmektedir. Rotorun merkezi şaftı, mekanik ana hareket ettiriciye bağlanmıştır. Manyetik alan, silindirik demir rotorun yüzeyinde oyulmuş yuvalara sarılmış iletkenler veya bobinler tarafından üretilir. Seri olarak

bağlanan bu bobin seti, alan sargısı olarak bilinir. Alan bobinlerinin konumu, statora hava aralığında üretilen manyetik alanın dışa doğru yönlendirilmiş veya radyal bileşeni, rotorun çevresi etrafında yaklaşık olarak sinüzoidal olarak dağıtılacak şekildedir. Şekil 3.4'de, hava boşluğundaki alan yoğunluğu üstte dışa doğru maksimum, altta içe doğru maksimum ve iki kenarda sıfırdır ve yaklaşık olarak sinüzoidal bir dağılıma sahiptir.

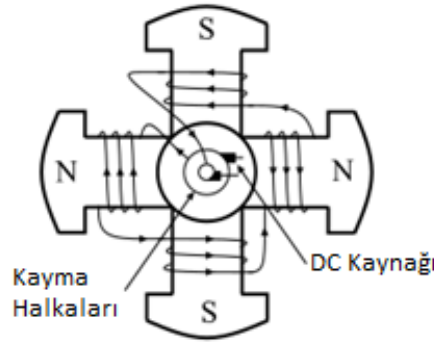


Şekil 3.4 Rotor ve stator (İnt.kyn.4).

3.1.2.3 Çıkık Kutuplu Rotor

Çıkık kutuplu terimi yansıma anlamına gelir. Bu nedenle, çıkık kutup rotoru, rotor çekirdeğinin yüzeyinden dışarı çıkıntı yapan kutuplardan oluşur. Tüm bu düzenleme, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi alternatörün miline sabitlenmiştir. Bireysel alan kutbu sargıları, alan sargısı DC uyarıcı tarafından enerjilendirildiğinde, bitişik kutupların zıt polaritelere sahip olacağı şekilde seri olarak bağlanır. Çıkık kutup tipi rotor, aşağıdaki nedenlerden dolayı dizel motorlar veya su türbinleri tarafından tahrik edilenler gibi düşük ve orta hızlı (120 ila 400 RPM) alternatörlerde kullanılır (Tufan 2013).

Çıkık kutuplu rotor tipi rotorun yapısı, yüksek hızda maruz kalabilecekleri mekanik gerilmelere dayanacak kadar güçlü yapılamaz. Yüksek hızda çalışırlarsa, rüzgar kaybına neden olur ve gürültü üretme eğilimindedir. Alternatörlerin düşük hızlı rotorları, kutuplar için gerekli alanı sağlamak için geniş bir çapa sahiptir. Sonuç olarak, göze çarpan kutup tipi rotorlar büyük çapa ve kısa eksenel uzunluğa sahiptir.



Şekil 3.5 Çıkık kutuplu rotor (İnt.kyn.5).

3.1.2.4 Silindirik Kutuplu Rotor

Silindirik rotorlar, yüksek kaliteli nikel-krom-molibden çeliğinin katı dövmelerinden yapılmaktadır. Bu tip rotorların yapısı, çıkık kutup rotorlarında olduğu gibi belirgin fiziksel kutuplara sahip değildir. Silindirik rotorun dış çevresinin yaklaşık üçte ikisi, rotor miline paralel olarak düzenli aralıklarla kesilmiş yuvalarla donatılmıştır. Saha sargıları bu yuvalara yerleştirilir ve DC beslemesi ile uyarılır. Alan sargısı dağıtılmış tiptedir. Rotorun oluksuz kısmı, kutup yüzlerini oluşturur. Silindirik rotor şeklinden dolayı, kutuplar göze çarpmaz ve rotor yüzeyinden dışarı çıkmazlar.

Silindirik tip rotor yapısı, daha fazla mekanik güç sağlar ve daha iyi dinamik dengeleme sağlar. Düzgün hava boşluğu sayesinde yüksek hızlarda gürültüsüz çalışma sağlar ve rotorun çevresi etrafındaki akı dağılımı neredeyse bir sinüs dalgasıdır ve bu nedenle daha iyi bir EMF dalga formu elde edilir. Silindirik tip rotor yapısı, bu gerekçelerden dolayı türbinleri tarafından tahrik edilenler gibi yüksek hızlı (1500 ila 3000 RPM) alternatörlerde kullanılır (Uçmaz, 2008).

Silindirik rotorlu bir alternatör nispeten küçük bir çapa ve uzun aksenel uzunluğa sahiptir. Silindirik rotor alternatörlerine turbo alternatörler veya turbo jeneratörler denir. Silindirik rotorlu alternatör her zaman yatay yapılandırma kurulumuna sahiptir.

3.1.2.5 Stator

Şekil 3.4'deki temel jeneratörün statoru, manyetik akı için kolay bir yol sağlamak üzere demirden yapılmış silindirik bir halkadan oluşur. Bu durumda, stator sadece bir bobin içerir, iki taraf demirdeki yuvalara yerleştirilmiştir ve uçlar, stator çevresi etrafındaki kavisli iletkenlerle birbirine bağlanmıştır. Bobin normalde birkaç dönüştürme oluşur. Rotor döndürüldüğünde, stator bobininde bir voltaj indüklenir. Herhangi bir anda voltajın büyüklüğü, bobinin çevrelediği manyetik alanın zamanla değişme hızıyla, yani manyetik alanın bobinin iki yanından geçme hızıyla orantılıdır. Bu nedenle voltaj, rotor Şekil 3.4'de gösterilen konumdan 90° döndüğünde bir yönde maksimum olacak ve 180° sonra ters yönde maksimum olacaktır. Gerilimin dalga biçimi yaklaşık olarak Şekil 3.3'de gösterilen sinüs biçiminde olacaktır.

3.1.2.6 Frekans

Elektrikte frekans, alternatif akım (AC) sistemlerinde gerilim veya akım dalgalarının periyotlarının sayısıdır. Birim zamanda tamamlanan dalgaların sayısını ifade eder ve genellikle hertz (Hz) birimiyle ölçülür. Frekans, dalga hareketinin tekrarlanma hızını temsil eder.

Alternatif akım, sürekli olarak yön değiştiren bir akımdır. Bu akımın gerilim veya akım değeri, periyodik olarak tekrar eden bir dalgada yükselir ve düşer. Frekans, bu dalga birim zamanda (genellikle saniye başına) kaç kez tam bir döngü yaptığını ifade eder.

Şekil 3.4'deki jeneratörün rotor yapısı, biri dışa doğru yönlendirilen manyetik akı için ve diğeri içe doğru yönlendirilen akı için karşılık gelen iki kutba sahiptir. Rotorun her dönüşü için stator bobininde bir tam sinüs dalgası indüklenir. Bu nedenle, hertz (saniyedeki devir sayısı) cinsinden ölçülen elektrik çıkışının frekansı, saniyedeki devir cinsinden rotor hızına eşittir. Örneğin, 60 hertz'de bir elektrik kaynağı sağlamak için, ana işletici ve rotor hızı saniyede 60 devir veya dakikada 3.600 devir olmalıdır. Bu, birçok buhar ve gaz türbini için uygun bir hızdır. Çok büyük türbinler için, mekanik stres nedeniyle bu tür bir hız aşırı olabilir. Bu durumda, jeneratör rotoru 90° aralıklarla yerleştirilmiş dört kutuplu olarak tasarlanmıştır. 90° 'lik benzer bir açıyı kapsayan bir stator bobininde indüklenen voltaj, devir başına iki tam sinüs dalgasından oluşacaktır. 60

hertz'lik bir frekans için gerekli rotor hızı, dakikada 1.800 devirdir. Çoğu su türbininde kullanılanlar gibi daha düşük hızlar için daha fazla sayıda kutup çifti kullanılabilir.

N: Devir sayısı

f: Frekans

P: Kutup sayısı

$$N = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (3.2)$$

3.1.2.7 Uyarma Akımı

Uyarma akımı, bir jeneratörde rotorun manyetik alanını oluşturmak için kullanılan bir akımdır. Bu akım, jeneratörün çalışma prensiplerine dayanır ve jeneratörün doğru gerilim değerlerini üretebilmesini sağlar.

Jeneratörler, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için manyetik alan kullanır. Manyetik alan, jeneratörün rotorunda yer alan manyetik bir alan tarafından oluşturulur. Rotor, manyetik bir alana sahip olmadığında veya manyetik alan yetersiz olduğunda jeneratör çıkış gerilimi düşük olur veya tamamen üretemez. Uyarma akımı, jeneratörün rotoruna uygulanan bir akımdır ve manyetik alanın oluşturulması için gereklidir. Uyarma akımı, rotor sargılarına doğrudan uygulanır ve rotorun manyetik alanını oluşturmak için kullanılır. Bu manyetik alan, stator sargıları tarafından kesilerek bir elektrik gerilimi indükler ve jeneratörün çıkış gerilimini oluşturur (Tufan 2013).

Bu akım bir kaynak tarafından sağlanır. Bu kaynak, genellikle bir batarya veya başka bir dış kaynak olabilir. Uyarma akımı, jeneratörün çalışma prensiplerine uygun olarak doğru bir şekilde ayarlanmalıdır. Uyarma akımının uygun bir seviyede olması, manyetik alanın istenen düzeyde oluşturulmasını sağlar. Uyarma akımı aynı zamanda jeneratörün gerilim regülasyonunu da etkiler. Jeneratörlerin çıkış gerilimi, yük değişiklikleriyle birlikte genellikle biraz dalgalanır. Uyarma akımının doğru şekilde ayarlanması, jeneratörün yük değişikliklerine hızlı bir şekilde tepki vermesini ve nominal gerilim değerlerini korumasını sağlar.

Uyarma akımı, jeneratörün çalışma koşullarına bağlı olarak değişebilir. Örneğin, büyük güçlü jeneratörlerde uyarma akımı daha yüksek olabilirken, küçük jeneratörlerde daha düşük olabilir. Ayrıca, jeneratörün tasarımı, kullanım amacı ve çıkış gereksinimleri de uyarma akımının ayarlanmasını etkileyebilir.

3.1.2.8 Jeneratör Derecelendirmesi

Jeneratör derecelendirmesi, bir jeneratörün belirli işletme koşullarında ne kadar güç üretebileceğini ve performansını ifade eden bir değerdir. Bu derecelendirme, jeneratörün tasarımı, kapasitesi ve özellikleri hakkında bilgi verir ve jeneratörün doğru şekilde kullanılmasını sağlar.

Senkron bir jeneratörün kapasitesi, faz başına voltaj ve akıma ve faz sayısına eşittir. Normalde büyük jeneratörler için megavolt-amper (MVA) veya küçük jeneratörler için kilovolt-amper (kVA) olarak belirtilir.

Jeneratörün voltaj derecesi normalde üç terminalinden ikisi arasındaki çalışma voltajı olarak belirtilir yani, fazdan faza voltaj. Üçgen bağlanmış bir sargı için, bu faz sargı voltajına eşittir. Yıldız ile bağlı bir sargı için, fazlar arası gerilim faz ve nötr arası gerilimin $\sqrt{3}$ katına eşittir.

Makinenin kapasite derecesi, iki faktör nedeniyle şaft gücünden farklıdır yani, güç faktörü ve verimlilik. Güç faktörü, elektrik yüküne verilen gerçek gücün, tüm fazlar için toplam voltaj-akım ürününe bölünmesiyle elde edilen orandır. Verimlilik, elektrik gücü çıkışının mekanik güç girişine oranıdır. Bu iki güç değeri arasındaki fark, değişen akı nedeniyle manyetik demirdeki kayıplardan, stator ve rotor iletkenlerinin direncindeki kayıplardan, rüzgâr ve yatak sürtünmesinden kaynaklanan kayıplardan oluşan güç kaybıdır. Büyük senkron jeneratörlerde, bu kayıplar genellikle kapasite derecesinin %5'inden azdır. Bu kayıplar, sıcaklığı sargıların yalıtımının getirdiği sınır dahilinde tutmak için bir soğutma sistemi ile jeneratörden uzaklaştırılmalıdır.

3.1.3 Gaz Türbinleri ve Bileşenleri

Gaz türbini motoru, bir içten yanmalı motora benzer şekilde çalışır ve dönme hareketi üretmek için gaz kullanır. Bu motor türü, çalışma sıvısı olarak gazı kullanarak bir türbini döndürmek amacıyla tasarlanmıştır. Gaz türbini motoru terimi aynı zamanda, Şekil 3.6’da görüldüğü üzere minimum tek kompresör, bir türbin ve bir yanma odasından oluşan tam olarak bir içten yanan motoru tanımlamak için de kullanılır.

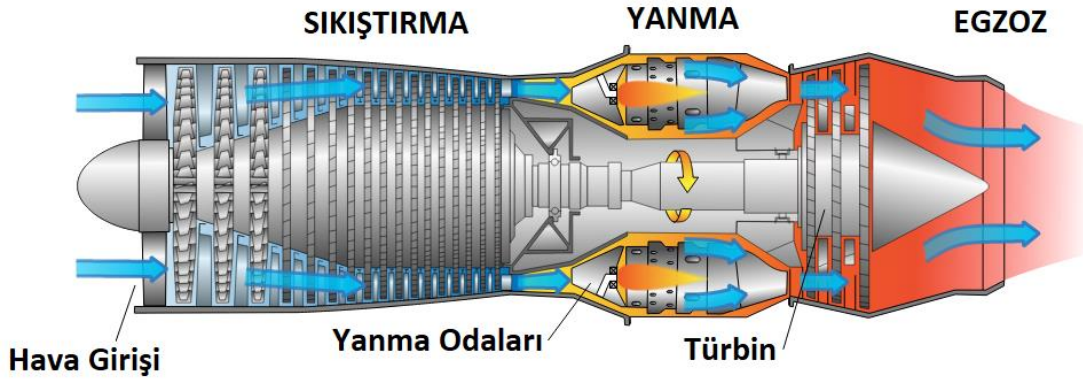
Gaz türbini motorundan faydalı iş veya itici itme elde edilebilir. Bir jeneratörü, pompayı veya pervaneyi çalıştırabilir veya saf bir jet uçağı motoru durumunda, türbin egzoz akışını bir nozuldan hızlandırarak itme kuvveti geliştirebilir. Bu tür bir motor, pistonlu içten yanmalı motorlardan çok daha küçük ve hafif olmasına rağmen, büyük miktarda güç üretebilir. Pistonlu motorlar, pistonun aşağı ve yukarı hareketine dayanır. Bu hareket sonrasında bir krank mili düzenlemesiyle dönme hareketine dönüştürülmelidir. Bununla birlikte, gaz türbini motoru doğrudan döner mil gücü sağlar. Kavramsal olarak gaz türbini motoru basit bir cihaz olmasına rağmen, verimli bir ünite için bileşenler, çalışma sırasında karşılaşılan yüksek sıcaklıklar ve gerilmeler nedeniyle pahalı malzemelerden dikkatlice tasarlanmalı ve üretilmelidir. Bu nedenle, gaz türbini motor kurulumları genellikle uygun maliyetli hale geldikleri büyük ünitelerle sınırlıdır.

Çoğu gaz türbini motoru, açık bir döngüde çalışır. Bu döngüde, motor havayı atmosferden alır ve bir eksenel akışlı veya santrifüjlü kompresörde sıkıştırır. Sıkıştırılan havayla sonrasında yanma odası beslenir. Yanma odasında, yakıt eklenir ve havanın bir kısmıyla stabil bir basınç değerinde yakılır. Ek basınçlı hava, yanmanın olduğu bölümün etrafından atlanır ve yüksek sıcaklıkta yanma gazlarıyla karıştırılır. Bu ek basınçlı hava, türbinin sürekli çalışabilmesi için yanma odası çıkışının sıcaklığını düşük tutmaya yardımcı olur. Eğer motorun shaft gücü üretecekse, yanma ürünleri türbinde atmosferik basınca doğru genişler. Çoğu türbin çıkışı, kompresörü çalıştırmak için gereken gücü sağlamak amacıyla kullanılır. Sadece kalan bir kısmı pompa, jeneratör veya başka cihazlar için shaft işi vermek amacıyla kullanılır. Jet motorlarında türbini, kompresör ve yardımcı cihazları çalıştırmak için yeterince çıkışı sağlayacak şekilde tasarlanmışlardır. Gaz akışı sonrasında bir nozuldan geçerek ara bir basınç seviyesinde terk eder ve itme gücü üretir.

İdealize edilmiş bir gaz türbini motoru, basit brayton döngüsünde herhangi bir kayıp olmadan çalıştığında düşünülür. Örneğin, hava 15°C sıcaklıkta ve atmosferik basınçta kompresöre girer ve bir megapascal basınca sıkıştırılır. Yakıttan gelen ısı, sabit bir basınçta türbin üzerinden geçerken sıcaklık 1.100°C'ye kadar yükselir. Bu idealize edilmiş motor bir megapascal basınca geri dönmenden önce ısıyı emer. Bu idealize edilmiş ünite, kompresörü çalıştırmak için 1,68 kilowatt güç tüketirken her bir kilowatt faydalı güç için 0,68 kilowatt'lık bir türbin çıkışına ihtiyaç duyacaktır. Ünitenin termal verimliliği (üretilen net enerji, yakıttan sağlanan enerji ile bölünür) %48 olacaktır (Toprak 2007).

Eğer aynı sıcaklık ve basınç sınırları içinde çalışan ünite için türbin ve kompresör yalnızca %80 verimli ise (dolayısıyla, kompresörün gerçek çalışması, ideal işin %80'ine eşitken ve gerçek türbin çıkışı da ideal çıkışın %80'ine denk gelir.), diğer bileşenler standart olsa bile sonuç önemli seviyede değişir. Her kilowatt net iş için, kompresör 2,71 kilowatt güç tüketirken, türbinin artık 1,71 kilowatt üretmesi gerekmektedir. Bu durumda termal verimlilik yüzde 25,9'a düşer. Bu, yüksek verime sahip kompresör ve türbinlerin önemini ifade etmektedir. Tarihi olarak, gaz türbinlerinin gelişmesini geciktiren zorluklardan biri, hatta verimli türbinden daha verimli kompresörler üretmektir. Ancak modern üniteler, tasarım koşullarında yüzde 86-88 kompresör verimliliği ve %90 türbin verimliliği gibi yüksek değerlere sahip olabilirler.

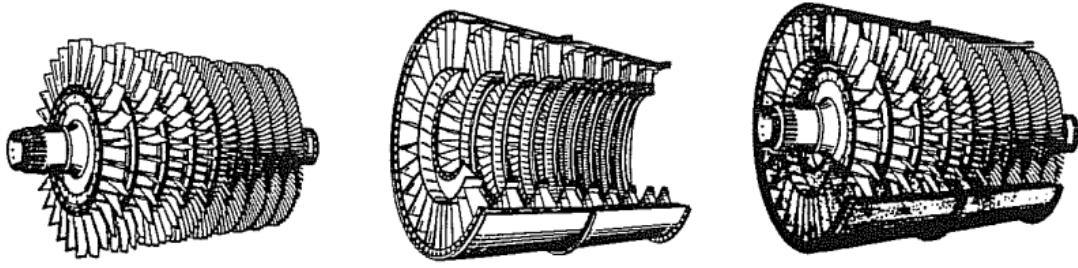
Türbin verimliliği ve güç çıkışı, türbin giriş sıcaklığının artırılmasıyla artırılabilir. Ancak, malzemelerin yüksek sıcaklık seviyelerin direnç kaybetmesi ve türbinin kanatları yüksek hızlar ile döndüğü ve santrifüj streslere maruz kaldığı gerçeği göz önüne alındığında, 1.100 °C'nin yukarısında türbin girişi sıcaklığı özel kanat soğutması ihtiyacı oluşturur. Ayrıca, her maksimum türbin girişi sıcaklıkları için uygun bir basınç oranına sahip olduğunu gösterir. Günümüz uçakların gaz türbinleri, kanat soğutmasıyla birlikte çalışarak, 1.370 °C'nin yukarısında türbin giriş yanma havası sıcaklıklarında, yaklaşık 30:1 basınç oranlarında çalışır. Bu kanat soğutma yöntemleri, yüksek performans ve verimlilik elde etmek için tasarlanmıştır.



Şekil 3.6 Gaz türbini (İnt.kyn.6).

3.1.3.1 Kompresör

Kompresör, havanın sıkıştırıldığı ve yanma odasına doğru ilerlediği bölümdür. Kompresör, gaz türbininin hava giriş kanallarından aldığı havayı yüksek basınç altında sıkıştırarak yanma odasına besler. Kompresörün tasarımı, gaz türbininin verimliliği ve performansı açısından son derece önemlidir. Kompresör, genellikle birden fazla aşamada oluşur ve her aşama, havayı bir önceki aşamadan daha yüksek bir basınca sıkıştırır. Kompresör aşamaları, statik ve döner kanatlar gibi bir dizi özellikli bileşen içerir. Statik kanatlar, havanın akış yönünü değiştirirken, döner kanatlar, havayı sıkıştırarak hava basıncını artırır. Kompresördeki statik kanatların açısı, hava akışının hızını ve yönünü kontrol ederken, döner kanatların şekli ve açısı, hava akışını sıkıştırarak hava basıncını artırır. Şekil 3.7’de tipik kompresörün yapısını görebilirsiniz. Kompresörün verimliliği, havanın sıkıştırılması sırasında oluşan ısı kaybını minimize etmek için optimize edilir. Bu, kompresörün tasarımı sırasında malzeme seçimi, kanat geometrisi, havanın akış yolu ve diğer faktörlerin dikkatlice hesaplanmasını gerektirir. Kompresör ayrıca, havayı sıkıştırırken oluşan yüksek sıcaklıkların neden olduğu aşınma ve korozyona karşı da korunmalıdır. Kompresör, gaz türbinlerinin verimliliği ve performansı için kritik bir bileşendir. Kompresörün tasarımı ve işletimi, tesisin performansını ve güvenilirliğini optimize etmek için sürekli olarak geliştirilmelidir (Toprak 2007).



Şekil 3.7 Kompresör ve kanatları (Taştan 2011).

İlk gaz türbinleri, daha basit ve ekonomik olan santrifüjlü kompresörler kullanıyordu. Ancak, bu tür kompresörler alçak basınç oranı ile sınırlıydı ve günümüz eksenel akışlı kompresörün verimlilik seviyelerine ulaşamıyorlardı. Bu nedenle, günümüzde santrifüjlü kompresörler genellikle küçük endüstriyel ünitelerde tercih edilen bir seçenek olarak kullanılmaktadır. Modern gaz türbin sistemlerinde ise genellikle daha verimli eksenel akışlı kompresörler tercih edilmektedir. Bu kompresörler, daha yüksek basınç oranları ve daha iyi performans sağlayarak enerji verimliliğini artırmaktadır.



Resim 3.1 Gaz türbini kanatları (İnt.kyn.8).

Eksenel akışlı kompresörler, reaksiyon türbinlerinin tam tersi olarak çalışır. Bu tip kompresörlerde, kavisli hava kanatları bulunur ve bu kanatlar bıçakların bir tarafındaki basınçları diğer taraftan daha yüksek olacak şekilde sıvı üzerinde teğetsel bir kuvvet oluşturacak şekilde bükülmüştür. Subsonik akış için, basınç artışı akış alanının genişlemesini gerektirir, böylece bıçaklar arasındaki akış hızını azaltır ve akışı dağıtır. Kompresör kanatları, birbirine yakın aralıklı, yüksek kavisli hava kanatları olarak görülebilir, bu sayede hava akışı güçlü bir şekilde etkileşime girer. Basınç artışı sadece

bıçaklar boyunca değil, aynı zamanda bıçaklar arasında da meydana gelir. Akış sürtünmesi, sızıntı, önceki bıçak setlerinden kaynaklanan uyanmalar ve ikincil dolaşım lar ya da girdap akışları, gerçek bir kompresördeki kayıplara destekte bulunur. Sabit bıçak düzenekleri olan kaskadlar, spesifik rüzgâr tünellerinde test edilebilir, fakat dönen düzenekte gerçek bıçak düzenlemeleri için özel test kurulumları veya teçhizatlar gereklidir. Türbin ve kompresör kanatları Resim 3.1'deki gibidir.

Kanatlar, düzgün aerodinamik yapıya sahip olmanın yanı sıra hafif olmalı ve titreşimlere karşı dayanıklı olmalıdır. Kompresör ile türbinin kanat tasarımı, detaylı bilgisayar programlarıyla desteklenen son gelişmelere dayanmaktadır.

Reaksiyon türbin aşamasında orta büyüklükte genişleme-basınç oranları elde edilebilirken, kompresör aşaması yalnızca nispeten küçük basınç artışları sağlar. Modern tasarımlarda, genellikle aşama başına 1,35 ila 1,4 arasında bir basınç oranı kullanılır. Bu nedenle, kompresörler, türbinlere kıyasla daha fazla aşamaya ihtiyaç duyar. Daha yüksek basınç oranları denenirse, akış kanatlardan ayrılmaya başlar ve bu da türbülansa, basınç artışının azalmasına ve kompresörün durdurulmasına neden olur. Ne yazık ki, kompresörler, küçük bir rahatsızlık durumunda bile çalışmayı durdurabilen bu duruma yakın yerlerde en verimli olurlar. Kompresörün yüksek verimliliği korunurken durmasını önlemek, tasarımcılar için büyük bir zorluktur.

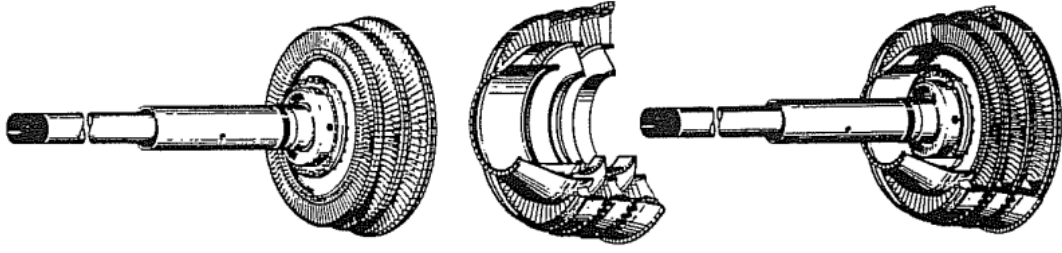
Hava sıkıştırılınca, hacmi düşer. Bu nedenle, akış hızının neredeyse aynı tutulması gerektiğinde, dairesel geçiş alanı da azaltılmalıdır, yani bıçaklar daha yüksek olan basınçlarda daha kısa olmalıdır. Hava akış hızlarının ve bıçak ucu hızlarının optimum dengesi genellikle kompresör düşük basınçlı ucunun yüksek basınçlı ucundan daha düşük bir hızda dönmesini gerektirir. Bu, büyük uçak gaz türbinlerinde, türbinin düşük basınçlı kısmı tarafından tahrik edilen düşük basınçlı uç şaftının, içi boş yüksek basınçlı kompresör türbin mili içinde farklı bir hızda çalıştığı ve her şaftın kendi yataklarına sahip olduğu makaralı şaftlarla gerçekleştirilir. İkiz ve üçlü makaralı motorlar da geliştirilmiştir.

3.1.3.2 Yanma Odası

Gaz türbinlerinde yanma odası, yüksek sıcaklık ve basınç altında yanma işleminin gerçekleştiği bir bölmedir. Yanma odası, genellikle çelikten yapılmış bir gövdedir ve yakıt enjeksiyonu için tasarlanmış bir veya daha fazla püskürtme aparatına sahiptir. Yanma odası içindeki yakıt püskürtme aparatları, yakıtı yanma odasına enjekte eder ve havanın doğru oranda karışması için tasarlanmış hava giriş kanalları ile birleştirilir. Yakıt ve hava karışımı, yanma odası içinde yakılır ve sonucunda yüksek sıcaklık ve basınç oluşur. Bu yüksek sıcaklık ve basınç, yanma odasının malzemesine dayanabilecek seviyede tasarlanır ve koruyucu kaplamalar veya soğutma sistemleri gibi ek önlemlerle güçlendirilir. Yanma sonucu oluşan yüksek basınçlı gaz, türbinin güç kanatlarına doğru akar ve rotoru döndürür. Yanma odasından çıkan gaz, türbinin sonraki aşamalarına veya egzoz sistemine yönlendirilir. Yanma odası tasarımı, türbinin verimliliği, emisyonları ve performansı için kritiktir. Yanma odasının boyutu, geometrisi, yakıt enjeksiyon yöntemi ve hava girişi gibi faktörler, yanma verimliliği ve emisyonları etkileyebilir. Yanma odası tasarımı, tesisin performansını ve çevresel etkilerini optimize etmek için sürekli olarak iyileştirilir. Yanma odası, gaz türbinlerinin en kritik bileşenlerinden biridir ve yakıt tüketimi, performans ve güvenilirlik açısından büyük bir rol oynar. Bu nedenle, yanma odası tasarımı, malzeme seçimi, işletme koşulları ve bakım programları, tesisin optimal çalışmasını sağlamak için özenle planlanmalı ve uygulanmalıdır (Toprak 2007).

3.1.3.3 Türbin

Gaz türbinleri, havanın sıkıştırılmasından sonra yanma odasında yakıtla karıştırılarak yanar ve bu yanma gazları türbin bölümünde hareketli parçaların dönmesine neden olur. Türbin bölümü, gaz türbininin elektrik üretimi veya diğer endüstriyel uygulamalar için mekanik güç ürettiği kısımdır. Şekil 3.8'de genişleyerek artan güç kanatlarının yapısı görülmektedir.



Şekil 3.8 Türbin güç kanatları (İnt.kyn.7).

Türbin, genellikle birden fazla aşamadan oluşur. Her aşama, gazların basıncını ve sıcaklığını düşürür. Bu, gazların hızının artmasına ve türbin kanatlarının dönmesine neden olur. Aşama sayısı, türbinin boyutu ve uygulama alanına göre değişebilir. Türbin kanatları, gaz akışını kontrol eden ve gazların enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren bileşenlerdir.

Döner kanatlar, türbinin rotor kısmında bulunur ve hareket ederek enerjinin mekanik enerjiye dönüştürülmesini sağlar. Döner kanatların şekli ve açısı, gaz akışını optimize ederek türbinin verimliliğini artırır.

Statik kanatlar, türbinin sabit kısımlarında bulunur ve gaz akışının yönünü kontrol eder. Statik kanatların şekli ve açısı, gazların enerjisini mekanik enerjiye dönüştürme sürecinde döner kanatların çalışmasını optimize eder. Statik kanatlar ayrıca, gaz akışının türbin kanatları arasında daha eşit dağılmasını sağlar. Türbin kanatlarının malzeme seçimi, yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmalıdır. Genellikle, nikel bazlı alaşımlar veya seramik malzemeler kullanılır. Bu malzemeler, yüksek sıcaklıklar ve aşınma gibi zorlu koşullara dayanacak şekilde tasarlanmıştır.

Türbin bölümü, aşırı ısınma ve aşınma gibi sorunlardan korunmak için özel soğutma sistemleri kullanır. Soğutma sistemleri, türbin kanatlarına soğuk hava sağlar ve aşırı sıcaklıkların neden olduğu hasarı önler.

Gaz türbinlerinde türbin bölümü, elektrik üretimi, uçak gücü veya diğer endüstriyel uygulamalar gibi birçok farklı alanda kullanılır. Türbin bölümünün tasarımı ve işletimi,

tesisin performansını ve güvenilirliğini optimize etmek için sürekli olarak geliştirilmelidir.

3.1.3.4 Difüzör

Gaz türbinleri, gazın enerjisinin türbin rotorunu döndürerek elektrik enerjisi üretmek için kullanılan bir tür enerji dönüştürme sistemidir. Gaz türbinleri, hava uçaklarından elektrik santrallerine kadar birçok uygulamada kullanılır. Difüzör, gaz türbinlerinin önemli bir bileşenidir ve türbinin performansını artırmak için tasarlanmıştır. Difüzör, türbinin çıkış kısmında yer alan bir bileşendir ve yüksek hızlı gazın basıncını artırarak, türbinin çıkışından çıkan gazın daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar.

Difüzör, türbinin çıkışındaki yüksek hızlı gazı daralan bir kanaldan geçirerek gazın hızını azaltır ve basıncını artırır. Bu işlem, gazın enerjisinin daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar. Difüzör kanalı genişlediğinde ise gazın hızı azalırken, basıncı artar. Difüzörün tasarımı, türbinin performansını etkileyen birçok faktöre bağlıdır. Difüzörün boyutu, şekli ve açısı, türbinin çalışma koşullarına ve uygulamaya bağlı olarak değişebilir. Doğru tasarlanmış bir difüzör, türbinin daha yüksek verimle çalışmasını ve daha fazla güç üretmesini sağlar.

3.1.4 Transformatörler

Transformatör, elektrik enerjisi dönüştürücüsüdür ve AC (alternatif akım) elektrik enerjisini bir seviyeden başka bir seviyeye aktarmak için kullanılır. Transformatörler, elektrik enerjisi dağıtım sisteminde yaygın olarak kullanılır ve elektrik motorları, ışıktandırma sistemleri ve elektronik cihazlar gibi birçok endüstriyel uygulamada da kullanılır.

Bir transformatör iki veya daha fazla bobinden oluşur ve bu bobinler demir bir çekirdek veya hava boşluğu ile çevrilidir. Transformatörler, işlevlerine ve kullandıkları uygulamaya bağlı olarak farklı şekil ve boyutlarda olabilirler. Transformatörler, indüktif bir cihazdır ve çalışması, birincil (giriş) bobine uygulanan AC gerilimi, birincil bobinde bir manyetik alan yaratarak başlar. Bu manyetik alan, transformatörün demir çekirdeği

veya hava boşluğu boyunca hareket ederek, manyetik alanın ikincil (çıkış) bobinde bir gerilim indüklemesine neden olur. Bu ikincil gerilim, birincildeki gerilimin oranıyla doğru orantılıdır. Bir transformatörün çalışma prensibi, Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasasına dayanır. Bu yasa, bir manyetik alanın, bir döngü veya bobin boyunca değişen bir manyetik akı nedeniyle bir elektrik akımı indükleyeceğini söyler. Transformatörler, birçok farklı uygulama için kullanılabilir ve farklı boyutlarda ve güçlerde mevcuttur. Küçük transformatörler, elektronik cihazlarda güç kaynağı olarak kullanılırken, büyük transformatörler elektrik enerjisi dağıtım sisteminde kullanılır.

3.1.4.1 Güç Transformatörleri

Bir güç transformatörü, frekans değişmeden gücü farklı gerilim değerine dönüştürmek adına kullanılan statik makinedir. Dönen veya hareketli parça olmadığı için, bir transformatör statik cihaz olarak sınıflandırılır. Transformatör AC besleme ile görevini yapar. Transformatörler karşılıklı indüksiyon prensibine dayanarak çalışır. Alçak gerilim seviyesinde elektrik enerjisi üretimi çok uygun maliyetlidir. Teorik olarak, bu düşük voltaj seviyesi gücü alıcı uca iletilebilir. Bu düşük voltaj gücü, iletilirse, daha fazla hat akımı ile sonuçlanır ve bu da gerçekten daha fazla hat kaybına neden olur. Ancak bir gücün voltaj seviyesi artarsa, gücün akımı azalır. Sistemdeki kayıpları, iletkenin kesit alanında azalma yani sistemin sermaye maliyetinde azalma ve aynı zamanda sistemin gerilim regülasyonunu iyileştirir. Bu nedenle, verimli elektrik enerjisi iletimi için düşük seviyeli güç arttırılmalıdır. Bu, güç sistemi ağının gönderen tarafındaki step-up Transformatör ile yükseltilerek yapılır. Bu yüksek gerilim gücü doğrudan tüketicilere dağıtılamayacağından, aşağı inen transformatör yardımı ile alıcı uçta istenen seviyeye indirilmelidir. Elektrik güç transformatörü bu nedenle güç iletiminde hayati bir rol oynar. İki sargı transformatörü genellikle yüksek gerilim ve düşük gerilim oranının 2 veya daha büyük olduğu yerlerde kullanılır. Yüksek gerilim ve alçak gerilim arasındaki oranın 2 oranından az olduğu yerlerde oto transformatör kullanmak uygun maliyetlidir (Yoldaş 2011).

3.1.5 Atık Isı Kazanları

Bir atık ısı kazanı, oluşan ısıyı başka bir işlemle birlikte kullanarak boşa harcanmaktan kurtarır. Bu şekilde, normalde israf edilecek olan ısıyı kullanarak buhar üretir. Elde edilen buhar, elektrik üreten türbinleri çalıştırmak için kullanılabilir. Ayrıca, kazan sadece su veya diğer sıvıları ısıtmak için de kullanılabilir. Atık ısı kazanı, kullanılan enerjinin bir kısmını geri dönüştürdüğü için fosil yakıt tüketimini ve işletme maliyetlerini azaltır. Bu da atmosfere daha az sera gazı salınımı anlamına gelir. Atık ısı kazanı tasarımları genellikle iki ana tipe ayrılır: yangın borulu kazanlar veya kabuklu kazanlar ve su borulu kazanlar. Yangın borulu kazanlarda, suyla dolu bir bölgeyi çevreleyen çelik bir kabuk bulunur. Yanma işlemi sonucu oluşan sıcak gazlar, geri ve ileri hareket eden borulardan geçerek çevreleyen suya ısı transferi yapar (Kandemir 2019).

Yangın borulu atık ısı kazanları, kolay yapılabilmesi, kurulabilmesi ve bakımının basit olması gibi avantajlara sahiptir. Depolanan ısı enerjisi, kısa süreli ekstra talepleri karşılamak için kullanılabilir. Ancak, tüm ısı kullanıldığında yeniden dolması uzun zaman alabileceği bir dezavantaja sahiptir. Ayrıca, bu tip ekipmanlar su borulu kazanlara kıyasla daha yüksek basınçlarda çalışmamaktadır.

Su borulu atık ısı kazanları ise yangın borulu kazanlara göre daha yüksek buhar basınçlarıyla başa çıkabilmektedir, ancak inşa ve kurulum süreçleri daha zorlu olabilmektedir. Su borulu kazanlarda, daha dar borular kullanılır ve bu borular sıcak gazlar yerine suyla doludur. Bu tasarımda, yangın borulu kazanın içindeki sistem tersine çevrilir ve atık ısı su dolu boruları çevreler. Alev hasarını önlemek için kazan boruları yalıtım malzemeleriyle korunur. Su borulu atık ısı kazanları, yüksek basınçları tolere edebilmenin yanı sıra, ısı girişindeki değişikliklere hızlı bir şekilde tepki verebilme özelliğine sahiptir.

Atık ısı kazanları, kombine ısı ve güç üreten tesislerde kullanılabilir. Bu tesisler, normalde elektrik üretimi sırasında yan ürün olarak ortaya çıkan ısıyı kullanarak enerji verimliliğini yaklaşık olarak %40 ila %70'e kadar artırabilen enerji santralleridir. Isı, tesisin sahasında veya yakın çevresinde kullanıldığında en yüksek verim elde edilir.

3.1.6 Ekonomizerler

Günümüzde enerji tasarrufu, çevre dostu ve sürdürülebilir enerji çözümleri gibi konuların önemi giderek artmaktadır. Endüstriyel tesislerin enerji verimliliği ve atık gaz emisyonlarının azaltılması için kullanılan teknolojik çözümlerden biri de ekonomizerlerdir.

Atık gazlar tarafından taşınan ısı hem hassas ısı (gaz sıcaklığına bağlı enerji) hem de gizli ısı (yoğuşma enerjisi) şeklindedir. Atık gazlar tarafından taşınan ve atmosfere atılan ısıyı, gerekli suyu ısıtarak geri kazandıran ısı eşanjör ünitelerine ekonomizer denir.

Ekonomizerler, enerji verimliliğinin artırılması ve işletme maliyetlerinin düşürülmesi için önemli bir rol oynar. Bu cihazlar, endüstriyel tesislerde kullanılan kazan sistemlerinde atık gazların içindeki ısının geri kazanılmasına olanak tanır. Ekonomizerler, atık gazların içindeki ısı enerjisini geri kazanarak, tesislerde daha az yakıt kullanılmasına ve dolayısıyla enerji maliyetlerinin düşmesine yardımcı olur. Aynı zamanda, bu cihazlar, atmosfere atılan atık gaz emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olur ve çevre dostu bir çözüm sunar. Temel olarak bir ısı değiştirici olarak çalışırlar. Bu cihazlar, atık gazların içinden geçen boru ve borunun çevresinde dolaşan bir akışkan içerir. Atık gazlar, boru içindeki akışkanı ısıtır ve bu ısı daha sonra kullanılabilen enerji haline dönüştürülür. Atık gazların içindeki enerjinin hem hassas ısı hem de gizli ısı olarak adlandırılan yoğuşma enerjisi şeklinde taşınabileceğini dikkate alır ve hem hassas ısıyı hem de gizli ısıyı geri kazanarak kullanılabilir enerjiye dönüştürür. Ekonomizerlerin kullanımı, endüstriyel tesislerde enerji tasarrufu sağlamak için yaygın bir uygulamadır. Bu cihazlar, kazan sistemleri ve enerji üretim tesisleri gibi birçok farklı endüstriyel uygulama için kullanılabilir. Aynı zamanda, işletmelerin enerji verimliliğini artırarak sürdürülebilir bir enerji yönetimi yaklaşımına katkıda bulunurlar.

Ekonomizerlerin faydaları sadece enerji tasarrufu ve çevre dostu bir çözüm sunmakla sınırlı değildir. Bu cihazlar, aynı zamanda işletmelerin karlılığını artırmak için de etkilidirler. Örneğin, daha az yakıt kullanımı ve daha düşük enerji maliyetleri, işletmelerin karlılığını artırır ve rekabet avantajı sağlar. Ayrıca, kullanımı, işletmelerin

enerji tüketimini azaltarak sürdürülebilir bir iş modeline sahip olmalarına yardımcı olur. Ekonomizerlerin yanı sıra, enerji verimliliğini artırmak için birçok farklı teknoloji ve çözüm de bulunmaktadır. Bunlar arasında yüksek verimli motorlar, enerji yönetim sistemleri, ısı pompaları, yenilenebilir enerji kaynakları ve daha birçok çözüm yer almaktadır. Bu teknolojiler ve çözümler, işletmelerin enerji verimliliğini artırarak, hem maliyetlerini düşürmelerine hem de çevre dostu bir işletme yönetimi benimsemelerine yardımcı olur.

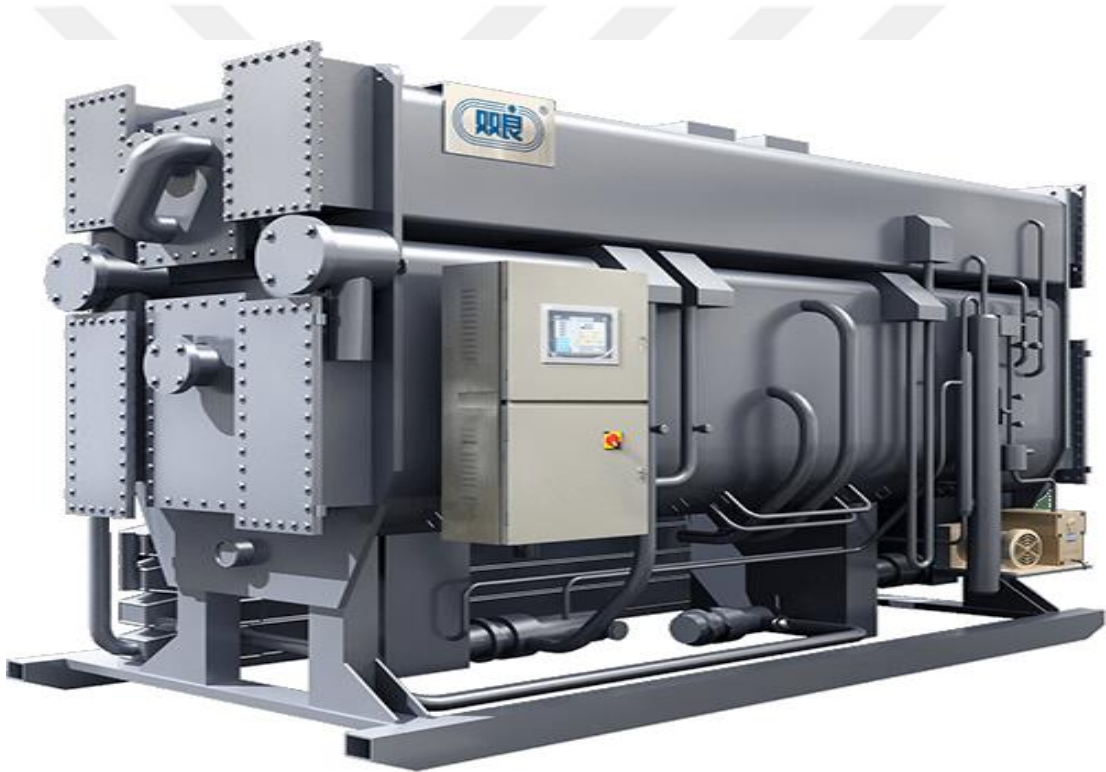
3.1.7 Absorbsiyonlu Chiller

Absorpsiyonlu chiller, soğutma işlemini gerçekleştirmek için termal enerji kullanan bir soğutucu sistemdir. Bu sistem, gaz soğutma çevrimine dayalı mekanik chillerlerden farklı olarak, bir çift etkili absorpsiyon işlemi ile çalışır. Bu nedenle, absorpsiyonlu chillerler genellikle düşük işletme maliyetleri, daha az enerji tüketimi ve daha çevre dostu olmaları nedeniyle tercih edilirler. Absorbsiyonlu chillerin dıştan görünüş yapısı Resim 3.2'deki gibidir. Absorpsiyonlu chillerlar, çoğunlukla ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) sistemleri, endüstriyel soğutma ve diğer soğutma uygulamalarında kullanılır. Bu sistemler genellikle doğalgaz, petrol, kömür, biokütle ve atık ısı gibi farklı kaynaklardan termal enerji elde ederler.

Absorpsiyonlu chillerlerin temel çalışma prensibi, su ve lityum-bromür (Li-Br) çözeltisi arasındaki kimyasal reaksiyondur. Bu çözelti, suyu absorbe ederek ve bu işlem sırasında soğuk su üreten bir buharlaştırıcıda ısıtılarak geri kazanılır. Buharlaştırıcının soğutucu akışkanı ise, genellikle bir kule tipi soğutucuda soğutulur ve çözelti, absorpsiyonlu chillerin regenerasyon işlemi için tekrar kullanılmak üzere depolanır. Absorpsiyonlu chillerler, çeşitli bileşenlerden oluşur. Bunlar genellikle bir absorpsiyon ünitesi, bir buharlaştırıcı, bir kondenser ve bir regenerasyon ünitesi içerir. Bu bileşenler arasındaki ısı ve kütle transferi işlemleri, çözeltinin buharlaştırıcıda su buharı ile temas ettiği sırada gerçekleşir. Bu işlem, çözeltinin suyu absorbe etmesi ve böylece soğutucu akışkanın soğutulması için gerekli olan buharlaştırma ısısının sağlanması için enerji üretir.

Regenerasyon ünitesi, çözeltinin buharlaştırıcının altında ısıtılarak, suyun serbest bırakılması ve çözeltinin yeniden kullanılmak üzere absorpsiyon ünitesine geri gönderilmesi için tasarlanmıştır. Buharlaştırıcının altında ısıtma işlemi için genellikle doğalgaz, atık ısı veya bir buhar kazanı kullanılır.

Kondenser, soğutucu akışkanın soğutulması için tasarlanmış bir bileşendir ve genellikle çevreye doğrudan havayla temas ederek soğutma işlemini gerçekleştirir. Kondenser, soğutucu akışkanın gaz halindeki haldeki halden sıvı haline dönüştürüldüğü yerdir. Bu sıvı haldeki soğutucu akışkan, bir genleşme valfi tarafından regenerasyon ünitesine geri gönderilir.



Resim 3.2 Absorbsiyonlu chiller (İnt.kyn.9).

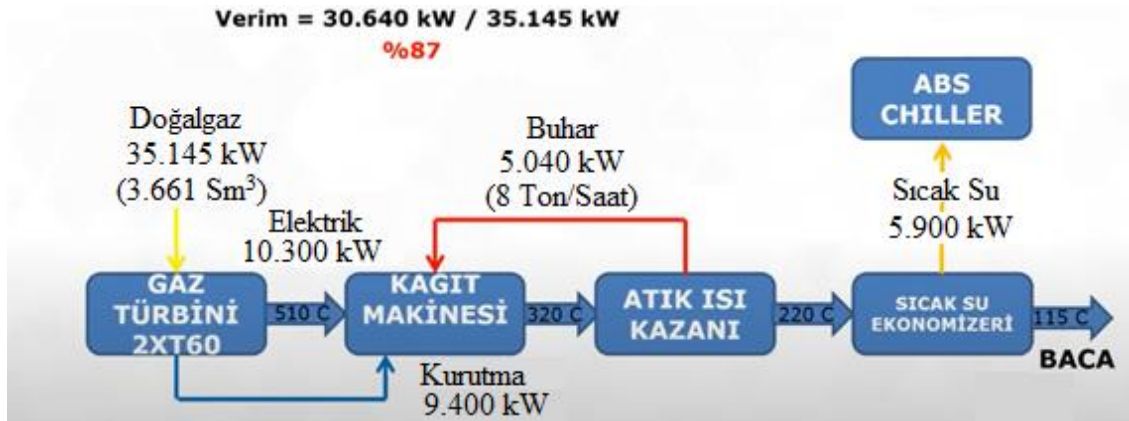
Absorpsiyonlu chillerler, genellikle mekanik chillerlara göre daha düşük verimlilik seviyelerine sahip olsalar da, doğalgaz, atık ısı gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenerek daha düşük işletme maliyetleri ile çalışabilirler. Ayrıca, kimyasal reaksiyonlar nedeniyle çevre dostudurlar ve ozon tabakasını zarar veren gazlar içermezler.

3.2 Metot

Bu çalışmada gaz türbinlerinde giriş havası soğutulmasının etkilerini incelemek için bir gaz türbinin çalışması detaylı olarak incelenerek türbin giriş havası değişimlerinin türbinde üretilen elektriğin güç değerinde ve verimindeki artışların etkileri incelenmiştir.

Çalışma ve analiz yapılacak sistemde Taurus 60 gaz türbini ve buna bağlı Çizelge 3.2’de teknik verileri olan Leroy Somer jeneratör kullanılmıştır. Bu sistem ile işletmenin ısı ve elektrik ihtiyacı yerinde üretim ile karşılanmaktadır. Soğutma için Li-Br solüsyonlu absorpsiyonlu chiller sistemi kullanılmaktadır ve tüm bu sistem trijenerasyon ile çalışmaktadır.

Şekil 3.9’da görülen sistemin çalışma yapısı doğal gaz ile gaz türbininde yanma sağlanarak aynı mile bağlı jeneratör ile elektrik üretimi ve gaz türbininden alınan 510 °C sıcak gazı kağıt kurutmasında kullanarak enerjisini tükettikten sonra 320 °C’de atık ısı kazanlarında buhar üretimi sağlanmaktadır. Ardından ekonomizere 220 °C’de giriş yaparak işletmenin sıcak su üretimi karşılanarak 115 °C olarak atmosfere atık gaz bırakılmaktadır. Ekonomizerde üretilen sıcak su ile absorpsiyonlu chillerler için gereken 100 derecelik sıcak su ihtiyacı karşılanıp absorpsiyonlu chiller kendi çevrimi ile 7 °C’ye soğuk suyu soğutmaktadır ve dönüşte 12 °C olarak dönen suyu tekrardan soğutacak şekilde çalışmaktadır. Hali hazırda trijenerasyon sisteminden sağlanan soğutmayı türbin giriş havasının soğutulması için de kullanarak elektrik üretimin artırılması ve elektrik verimini arttırmak ve toplam santral verimini de pozitif yönde etkilemek için giriş havası soğutma yöntemi uygulanmıştır.



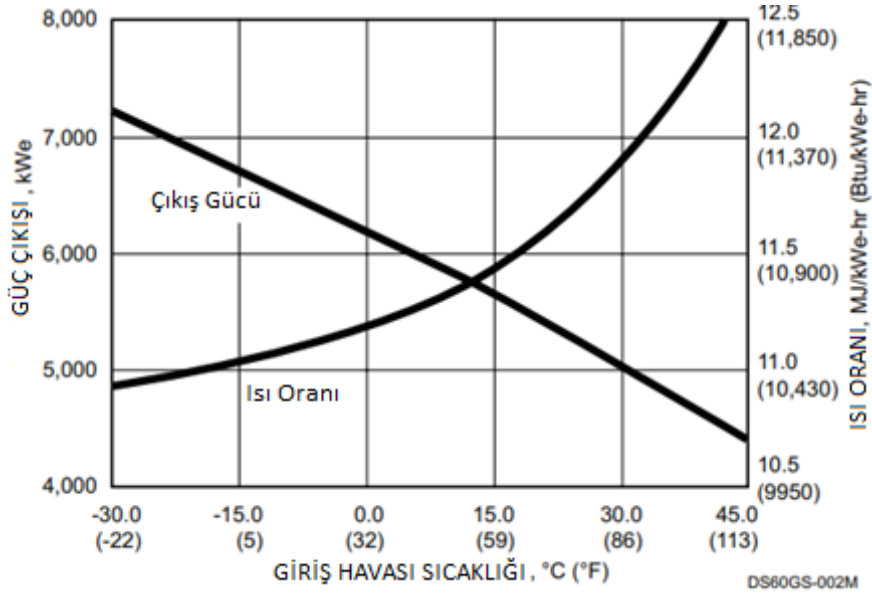
Şekil 3.9 Sistemin akış diyagramı (İnt.kyn.12).

Bu sisteme ait Şekil 3.10'da grafiksel teknik sıcaklık verileri gösterilen 1 adet gaz türbininde çeşitli sıcaklıklarda olan türbin giriş havasının elektrik üretim miktarındaki değişimini inceleyerek ve sonuçları gözlemledik.

Çizelge 3.1 Taurus 60 Gaz Türbini Teknik Verileri

Parametre	Değer
Tanım	Solar Taurus 60 Paketi
Güç çıkışı	5200 kW
Yakıt Yapılandırması	Doğalgaz
Yanma Tipi	DLN SoLoNOx
Toplam Çalışma Saati	30.000 Saat
Egzoz Çıkış Sıcaklığı	510 °C
Çalışma Devri	14951 Rpm 60 Hz/ 14944 Rpm 50 Hz
Tam Yükte T5 Sıcaklığı	677 °C
Jeneratör	4 Kutuplu, 3 Fazlı, 6 Telli Y Bağlantı
Basınç Oranı	12,2:1
Isı Oranı	11.430 kJ/kWe-saat
Egzoz Akışı	78.370 kg/saat

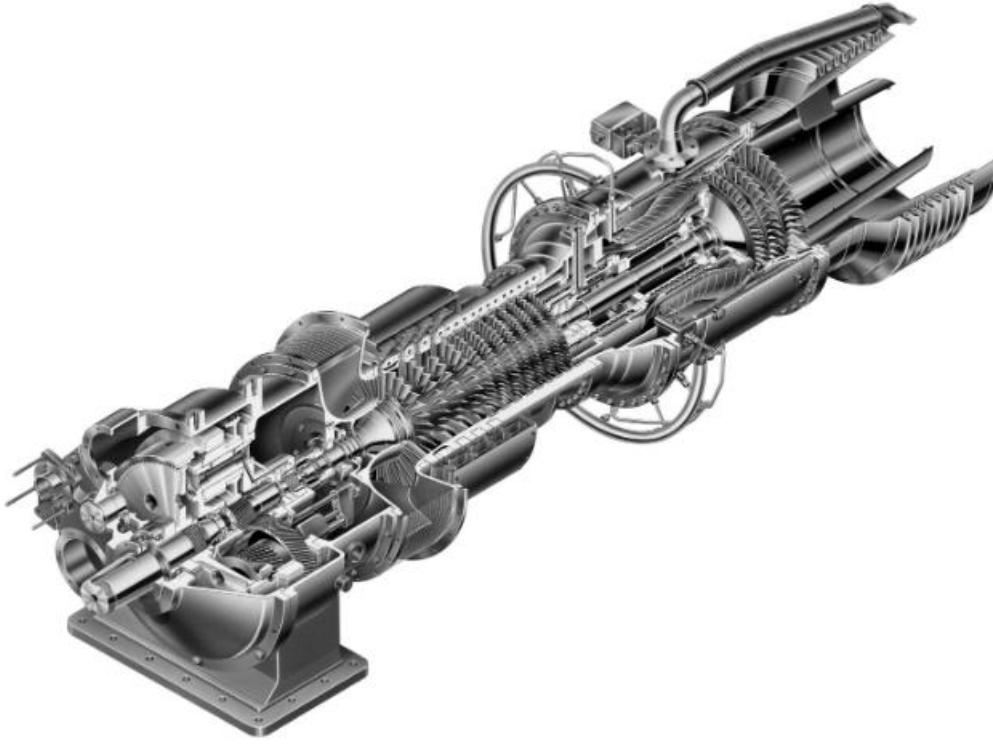
Taurus 60 gaz türbininin ISO şartlarında yani 15 °C ve deniz seviyesinde olan verileri paylaşılmıştır. Bu veriler rakım, sıcaklık, bağıl nem ve türbin çalışma saati değiştikçe değişkenlik gösterebilmektedir. Genel şartlarda Çizelge 3.1'de belirtilen verileri karşılayabilecek kapasiteye sahiptir.



Şekil 3.10 Taurus 60 performans grafiği (İnt.kyn.10).

Gaz türbinlerinde çalışma saatleri verimsel açıdan çok önemli bir husustur. Çalışma saati ilerledikçe gaz türbinlerinde verim düşüş eğilimine girmektedir. Üreticinin belirlemiş olduğu çalışma saatlerini dikkate alarak verimsel açıdan kayıp yaşamamak adına bu çalışma saatini aşan türbinler overhaul bakımlarının yapılması gerekmektedir. Taurus 60 gaz türbinleri için bu çalışma saati üretici tarafında 30.000 saat olarak belirlenmiştir. Tabiki de bu belirtilen saat teorik bir süredir. Verim analizleri gerçekleştirerek eğer halen verim korunuyorsa 35.000 saatlere kadar kullanımı gerçekleştirebilir. Bu sürenin değişkenliği tamamen türbine yapılan bakımların düzenli olması ve off-line yıkama ile belirli aralıklarda kanatların yıkamasının yapılması pozitif yönde kullanım ömrünü etkileyecektir.

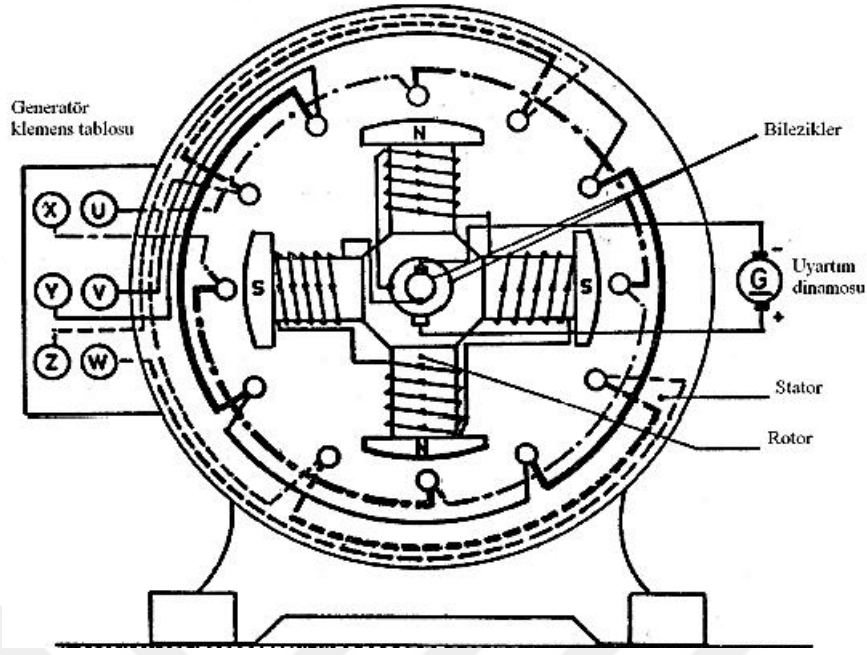
Overhaul sürecinde Şekil 3.11'deki üreticiden gelen yeni türbin pakedinin değişimi gerçekleştirilerek eski çalışma saatini tamamlayan türbin üreticiye gönderilir ve üretici bu gelen türbinin kanatlarının ve ekipmanlarının onarımını sağlayarak bir nevi yenileyerek tekrardan diğer kullanıcılara gönderimini gerçekleştirirler.



Şekil 3.11 Türbin iç yapısı (İnt.kyn.10).

Çizelge 3.2 Leroy Somer Jeneratör Teknik Verileri

Parametre	Değer
Tanım	Leroy Somer LSA 56 BVL8-4P
Güç çıkışı	5000 kW
Görünür güç çıkışı	6250 kVA
Devir	1500 RPM
Gerilim	11000 V
Frekans	50 Hz
Cos ϕ	0.8
Ağırlık	13100 Kg
Jeneratör	3 Fazlı, 6 Telli Y Bağlantı
Kutup sayısı	4 Kutuplu



Şekil 3.12 Jeneratör iç yapısı (İnt.kyn.11).

Türbinin çalışması ile dönen mile bağlı jeneratör %100 çalışma hızına geldiğinde ikaz akımı ile uyarılarak elektrik üretimine başlamaktadır. Şebeke gerilimi 31,5 kV olduğu ve jeneratörün üretmiş olduğu gerilim seviyesi 11 kV olduğundan dolayı jeneratörden sonra Çizelge 3.3’de teknik verileri olan step-up transformatör ile gerilim 31,5 kV seviyesine yükseltilir. Ardından şebekeye senkron olabilmesi için senkronoskop cihazı gerilim, frekans ve faz açısını değerlerini kontrol ederek şebeke ile uyumlu olabilmesi için ikaz akımını ayarlayarak senkron olmaya yardımcı olur. Şebeke ile gerilim, frekans ve faz açısı uyum sağladığında ise kesiciye kapat sinyali giderek şebekeye senkron olunur. Jeneratörün iç yapısı Şekil 3.12’deki gibidir.



Resim 3.3 Leroy Somer jeneratör

Resim 3.3'deki jeneratör türbinin şaftına kaplin ile entegre edilir ve türbin ile jeneratör arasında bir dişli kutusu mevcuttur. Bu dişli kutusu 14944 RPM devirde dönen türbin milindeki hızı 1500 rpm olacak şekilde indirir. Böylece jeneratörün 50 Hz frekansta üretim yapabilmesi için gereken devir olan 1500 rpm senkron hızı karşılamış olur.

Çizelge 3.3 Alstom Step-Up Transformatör Teknik Verileri

Parametre	Değer
Tanım	Alstom TCU4936
Nominal Güç	8000 kVA
Birincil Gerilim	11000 V
İkincil Gerilim	31500 V
Bağlantı grubu	YNd 5
Frekans	50 Hz
Soğutma şekli	ONAN
Anma akımı	315 A

Step-up transformatörler yüksek gerilim düzeyindeki daha düşük gerilimi daha yüksek bir gerilime yükselterek şebeke ile entegrasyonu sağlayabilir. Jeneratörler genelde YG kademesinde elektrik üretimi yaparlar. Bunun sebebi büyük güçler üretilirken gerilim yüksek tutularak akım düşürülür ve daha düşük çapla iletkenler kullanılır. Uygun boyutlarda ve uygun maliyetli hale gelirler. Ayrıca üretilip iletilmesinde daha düşük çapta kablo seçilebilir ve uzak noktalara taşınırken ekstradan transformatör gereksinimini ortadan kaldırır.

Çizelge 3.4’de belirtilen absorpsiyonlu chiller kullanarak hem işletme hem de türbin giriş havası soğutulmuştur. Bu soğutma ile türbin elektrik verimi arttırılmış ve ayrıca atık ısıdan daha fazla yararlanılarak trijenerasyon verimi arttırılmıştır.

Türbin giriş havası artışının ne kadar olduğunu ve hangi sıcaklıklarda üretime nasıl bir etkisi olduğunu veriler ile inceleyeceğiz.

Gaz türbinleri yapısı gereği giriş havası soğudukça kompresöre girebilecek birim alandaki hava miktarı daha fazla olmaktadır. Bunun sebebi hava soğudukça birim alandaki miktarı artar ısındıkça gaz genleştiğinden dolayı birim alandaki hava miktarı azalır. Türbin yanma odası içerisine hava kompresörde sıkıştırılarak giriş yapar ve soğuk olduğu için içerisindeki birim hava miktarı fazla olmasından daha iyi yanma sağlamaktadır. Soğuk havada yanma gerçekleştiğinden kaynaklı türbin, yanma odasının ulaşabileceği limit sıcaklığa daha fazla güç üreterek ulaşabilir.

Çizelge 3.4 Shuangliang Absorbsiyonlu Chiller Teknik Verileri

Parametre	Değer
Tanım	Shuangliang HSA 1400
Soğutma kapasitesi	4082 kW
Soğutulmuş su çıkış sıcaklığı	7 °C
Soğutulmuş su akışı	702 m ³ /h
Soğutma suyu giriş sıcaklığı	32 °C
Soğutma suyu akış	1626 m ³ /h
Sıcak su giriş sıcaklığı	100 °C
Sıcak su çıkış sıcaklığı	85 °C
Tüketilen elektrik	11,5 kW

Kullanılan Absorbsiyonlu chillerde Lityum-Bromür solüsyon kullanılmaktadır. Soğutma kapasitesi ise 3.510.520 kcal'dir.

Absorbsiyonlu chillerlerde kapasite hesabı aşağıda belirtilen formül ile hesaplanır;

$$Q = m * c * \Delta t \quad (3.3)$$

Q : Isı olarak adlandırılıp birimi kcal(kilokalori) veya kW(kilowatt)'tır.

m : Kütle olarak adlandırılır birimi kg/h (kilogram/saat)'tir.

c : Öz ısı olarak adlandırılıp birimi ca/gr °C(kalori/gram derece) olarak belirtilir.

Δt : Delta t olarak adlandırılıp giriş-çıkış sıcaklık farkıdır birimi °C olarak belirtilir.

Ayrıca sistem için gerekli olan soğutma kulesi seçiminde gereken soğutma kulesi kapasitesini yukarıdaki formül ile hesaplayabiliriz. Soğutma kulesi için istenen Δt miktarını da tespit etmek gerekir.

4. BULGULAR

4.1 Matematiksel Hesaplamalar

Öncelikle bulgular kısmında yaptığımız çalışmanın verisel detaylarını incelemekten gerekli olan trijenerasyon sistemleri ve elektriksel formül hesaplamalarıyla ilgili detayları hakkında bilgi paylaşmak daha doğru olacaktır.

$$Elektrik Verim = \frac{Aktif Güç(kW) Üretim}{Doğalgaz Tüketim(kw)} \quad (4.1)$$

Bu formül ile anlık üretilen aktif gücün ve anlık tüketilen doğalgaz'ın kW değeri oranlanır. Bu şekilde gaz türbininin elektriksel verimi bulunur.

$$Trijenerasyon Verimi = \frac{[Elektrik Üretimi] + [Buhar Tüketimi * 650] + [Kurutma İhtiyacı * 9,6]}{Doğalgaz Tüketimi * 9,6} \quad (4.2)$$

Bazı kabuller;

Doğalgaz alt ısı değeri = 8250 kcal/Sm³ = 9,59 kW/Sm³

Doğalgaz üst ısı değeri = 9155 kcal/Sm³ = 10,64 kW/Sm³

1 kcal = 4,18 kJ

1 kW = 860 kcal

Doğal gaz kullanımıyla ilgili ölçüm sistemlerinde, ölçüm yapılan gazın basıncı ve sıcaklığına bağlı olarak, sayaçlardan ölçülen hacim değeri düzeltilmelidir. Bu düzeltme işlemi, ölçüm yapılan gazın basıncı ve sıcaklığına göre hesaplanır. 300 milibar üzerinde doğalgaz kullanımı olan müşteriler için ölçüm sistemlerinde otomatik hacim düzetici olması gerekmektedir. 300 milibar dahil altında bulunan otomatik hacim düzenleyicisi bulunmayan sistemlerde, sayaçtan ölçülmüş hacim değeri düzeltme katsayısı (K) ile çarpılarak hesaplanır. Düzeltme katsayısı (K), ölçüm yapılan gazın basıncı ve sıcaklığına bağlı olarak değişir ve her ölçüm için ayrı ayrı hesaplanması gerekmektedir (İnt.kyn.1).

$$md = ms * K \quad (4.3)$$

$$K = \frac{P}{Pr} * \frac{Tr}{T} * \frac{Zr}{Z} \quad (4.4)$$

$$P = Pa + Ps \quad (4.5)$$

Burada,

ms : Mekanik sayaç ile ölçülen hacim,

md : Düzeltilmiş hacim değeri(m³),

P : Ölçüm basıncı(bar),

K : Düzeltme faktörü katsayısı,

Ps : Sayaç ölçüm basınç değeri(barg),

Pa : Aylık olarak şehir ya da başka ölçüm istasyonlarına girilen basınç değeri (bara),

Pr : Referans şartlarda olan basınç değeri (1013,25 mbar),

T : Pa değerinin alınmış olduğu Meteoroloji İstasyon Müdürlüğünden ilgili şehir için alınan son 10 yılın yoksa ilk ölçümün yapılacağı tarihten itibaren 75 cm için hesaplanan toprakaltı sıcaklık değerlerinin, her tahakkuk dönemi için ayrı ayrı olmak üzere, ortalaması(0K), ön ödemeli sayaçlarda bir önceki aya ait olan 75 cm için hesaplanan toprakaltı sıcaklık değerleri ortalaması (0K),

Z : Ölçüm şartlarında sıkıştırılabilirlik,

Tr : Referans şartlarda olan sıcaklık(288,15 0K),

Zr : Referans şartlarda olan sıkıştırılabilirliktir.

Zr / Z (sıkıştırılabilirlik oranı) : 1 olarak alınır.

Şehir girişi istasyonunda ölçülen atmosfer basıncı değerleri, ilgili olan şehir için son 10 yıla ait veya ilk ölçüm tarihinden ay bazında hesaplanmış atmosferin basıncı ortalamaları kullanılarak düzeltilir. Bu ortalamalar, ilgili şehrin meteoroloji müdürlüğü tarafından veya bulunmaması durumunda en yakın olan şehre ait meteoroloji müdürlüğü'nden temin edilir. Daha sonra, iletim veya dağıtım şirketi tarafından, diğer şirketin kontrolünde şehir giriş istasyonuna girilir. Başka ölçüm istasyonları için ise, lisans sahibi, istasyonun mahallinde ölçülen ya da en yakın olan meteoroloji istasyonu'ndan alınan atmosfer basınç değerlerinin son 10 yıla ait veya ilk ölçüm tarihinden ay bazındaki ortalamalarını kullanır.

Bu yöntemlerle, ölçüm yapılan basınç değerleri doğru şekilde düzeltilir ve kullanıcıya doğru fatura edilir.

Her fatura dönemi için doğru bir fatura tutarının belirlenmesi için gerçekleşen üst ısı değer düzeltilmesi yapılması gerekmektedir. Bu düzeltme işlemi, kullanılan doğal gazın gerçek enerji içeriğine göre hesaplanır ve faturalandırma işlemi buna göre yapılır. Böylece doğru miktarda doğal gaz satışı yapıldığından emin olunur.

$$mf = md * \frac{d}{860,42 \left(\frac{kcal}{kWh} \right)} \quad (4.6)$$

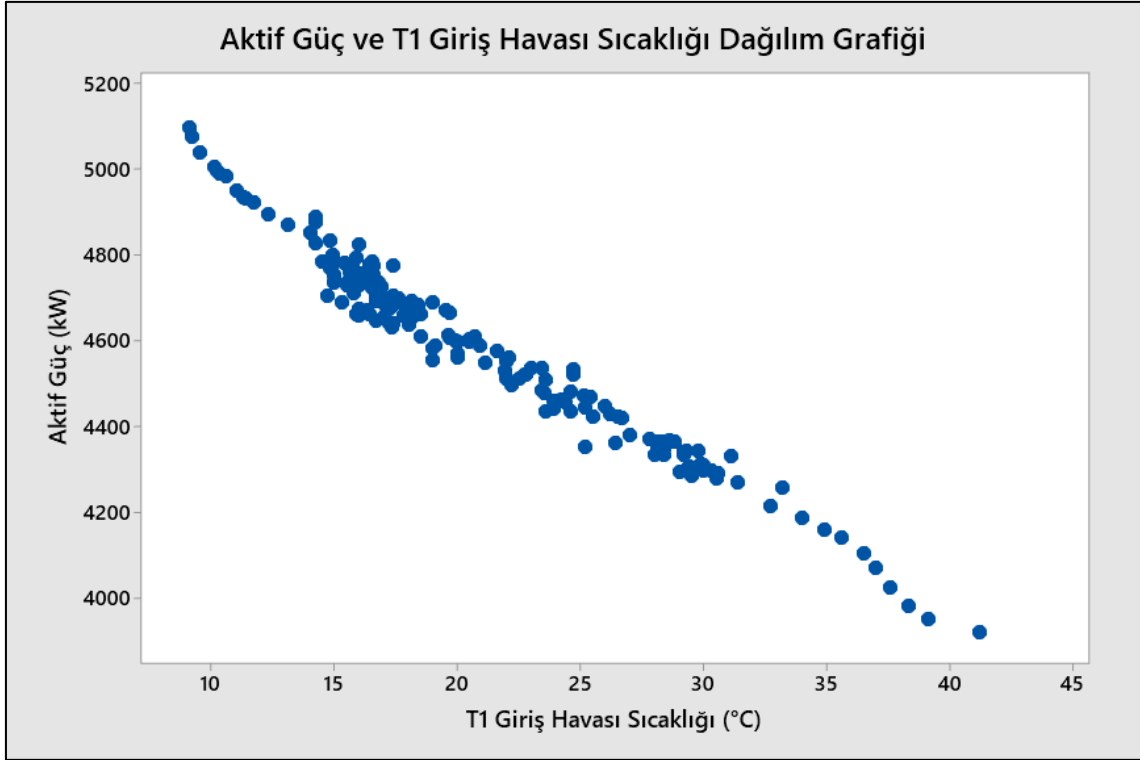
md : Düzeltilmiş hacim (m³),

d : İlgili tahakkuk dönemi fiili üst ısı değeri (kcal/m³).

mf : Faturalandırmaya esas alınan doğal gaz satış miktarı (kWh),

4.2 Türbin Giriş Hava Sıcaklığının Elektrik Üretimine Etkisi

Bu çalışmada gaz türbinlerinde giriş hava sıcaklığının değişiminin elektrik üretimine etkisini incelemek için 1 adet Solar Turbines Taurus 60 gaz türbininde çeşitli giriş hava sıcaklığında türbin elektrik üretim aktif güç değerlerinin verilerini topladık. 9,1 °C ile 41,2 °C arasındaki türbin giriş hava sıcaklıklarında elektrik üretim aktif güç değişimini verilerle inceleyip gözlemledik. Bu gözlemleri regresyon ve korelasyon analizi yaparak uyumlu olup olmadığı konusunda analiz edip grafiklerle verilerin uyumlu olduğunu saptadık. Şekil 4.1’de görüldüğü üzere türbin giriş hava sıcaklığı değişimine göre 9,1 °C ile 41,2 °C arasındaki sıcaklıklarda türbin elektrik üretimi 5098 kW ile 3919 kW arasında değişim göstermiştir.



Şekil 4.1 Aktif Güç/Türbin Giriş Hava Sıcaklığı İlişkisi

Grafikte 174 adet farklı zamanlarda alınmış olan sıcaklık ve aktif güç verilerini analiz ettiğimizde verilerin bize vermiş olduğu bulgular türbin giriş havası soğutulmasının türbin yanma odasının maksimum olarak çıkabileceği 677 °C türbin T5 sıcaklığında soğutulmuş T1 türbin giriş havası ile elektrik üretiminde artış olduğunu gözlemliyoruz.

Bu artışın türbin giriş havası sıcaklığının düşüşü ile elektrik üretim artışının uyumlu olduğunu söyleyebiliriz.

Burada bilinmesi gereken konu bu kıyas yapılırken türbin yanma odasının çıkabileceği en yüksek seviyede olması en sağlıklı sonucu verecektir. Bizim aldığımız tüm veriler türbinin maksimum çıkabileceği T5 sıcaklığı olan 677 °C’de alınan verilerdir.

Jeneratör elektrik üretiminde frekans ve hızını koruyabileceği şaft gücünde üretebileceği maksimum elektriği üretebilmek için ikaz akımını ayarlar.

	T1	9.8 °C	NGP	100.0 %	FCV	64.3 %	PCD	10.7 Bar	T5	678 °C	P	5.04 MW	Q	0.40 MVar	Lube	4.0 Bar	64 °C	Gas	13.8 Bar	Grid CB	4	Alarm	Stop	EStop
25/09/2022 10:47:25	Power UsrSet	5200 kW							T1 Air inlet Temp	9.8 °C					Shutdown									
	Active Power	5034 kW							T5 Temperature TC1	706 °C					Ready to Start									
SLD	Reactive Power	397 kVAR							T5 Temperature TC2	700 °C					Starting	295								
	Apparent Power	5007 kVA							T5 Temperature TC3	625 °C					Prelube Done	0								
OPERATOR	Power Factor	0.995 Cos φ							T5 Temperature TC4	685 °C					FGVtest	HP LP	62							
	Generator Excitation	3.6 A							T5 Temperature TC5	675 °C					MV2001									
FUEL	Phase-Phase Voltage	31.48 kV							T5 Temperature TC6	675 °C					Fill Pipe									
	Average Current	91.9 A							T5 Temperature CJ	52 °C					MV2002 MV2010									
LUBE OIL	Frequency	49.99 Hz							T5 Temperature AVG	678 °C					MV2010 Vent									
OVERVIEW	Grid Active Power	1495 kW							PCD	10.66 Bar					FGV Test Done									
	Grid Reactive Power	504 kVAR							Air Filter dP	38 mmH2O					Ventilation									
TREND	Export Energy	34974 MWh							Turbine Vibration	2.7 mm/sec					Damper o FAN 1									
	Export Reactive	3224 MVARh							Generator Vibration	0.5 mm/sec					Damper I FAN 2									
TURBINE	Import Reactive	1 MVARh							Gearbox Vibration	2.9 G					Starter Running									
PLANT	Geno Wind U Temp	100 °C							ST616_1 Speed Sensor	100.0 %					Purge Request	173								
	Geno Wind V Temp	96 °C							ST616_3 Speed Sensor	100.1 %					Cracking	45								
ELECTRIC	Geno Wind W Temp	98 °C							PLC Speed Value	100.0 %					Purging Bypass	60								
CONTROL	Geno Bearing A Temp	89 °C							Main FCV Command	64.3 %					Purging Boiler	60								
	Geno Bearing B Temp	84 °C							Main FCV Feedback	64.2 %					Ignition Permission									
Alarm Buffer	Turbine Bearing A Temp	86 °C							Gas Flow Meter	1288 kg/h					Ignition Lightoff	4								
Alarm & Event	Turbine Bearing B Temp	86 °C							Gas Total	9015902 kg					Accel %66	54								
Pending Alarms	Lube Oil Pres	4.05 Bar							Gas Pressure	13.75 Bar					Accel %90	44								
	Lube Oil Temp	63.5 °C							Gas Concentration	-0.0 %					Adjust Rated	20								
Alarm Status	Container Temp	54 °C							Control Room Temp	29 °C					Start CMD									
RESET									Synch Bias	-0.00 V					Ready to Load	227								

Resim 4.1 Türbin kontrol ekranı

Resim 4.1’de paylaştığım türbin kontrol arayüzünde T1 türbin giriş havası sıcaklığı 9,8 °C’de ve T5 yanma odası 678 °C maksimum ulaşabileceği sıcaklıktadır. Soğutulmuş giriş havasında gaz türbininin elektrik üretim performansı artarak 5034 kW aktif güç üretimi sağlamıştır.

	T1	16.0 °C	NGP	100.1 %	FCV	51.0 %	PCD	10.5 Bar	T5	678 °C	P	4.72 MW	Q	0.30 MVar	Lube	4.3 Bar	58 °C	Gas	14.2 Bar	Grid CB	3	Alarm	Stop	EStop
14/02/2023 13:25:09	Power UsrSet	4716 kW							T1 Air inlet Temp	16.0 °C					Shutdown									
	Active Power	4716 kW							T5 Temperature TC1	693 °C					Ready to Start									
SLD	Reactive Power	298 kVAR							T5 Temperature TC2	682 °C					Starting	397								
	Apparent Power	4763 kVA							T5 Temperature TC3	650 °C					Prelube Done	0								
OPERATOR	Power Factor	0.999 Cos φ							T5 Temperature TC4	684 °C					FGVtest	HP LP	62							
	Generator Excitation	3.4 A							T5 Temperature TC5	675 °C					MV2001									
FUEL	Phase-Phase Voltage	31.62 kV							T5 Temperature TC6	671 °C					Fill Pipe									
	Average Current	87.0 A							T5 Temperature CJ	31 °C					MV2002 MV2010									
LUBE OIL	Frequency	49.98 Hz							T5 Temperature AVG	676 °C					MV2010 Vent									
OVERVIEW	Grid Active Power	1536 kW							PCD	10.49 Bar					FGV Test Done									
	Grid Reactive Power	309 kVAR							Air Filter dP	54 mmH2O					Ventilation									
TREND	Export Energy	50290 MWh							Turbine Vibration	0.4 mm/sec					Damper o FAN 1									
	Export Reactive	5059 MVARh							Generator Vibration	0.2 mm/sec					Damper I FAN 2									
TURBINE	Import Reactive	50 MVARh							Gearbox Vibration	3.3 G					Starter Running									
PLANT	Geno Wind U Temp	77 °C							ST616_1 Speed Sensor	100.1 %					Purge Request	281								
	Geno Wind V Temp	70 °C							ST616_3 Speed Sensor	100.0 %					Cracking	39								
ELECTRIC	Geno Wind W Temp	71 °C							PLC Speed Value	100.1 %					Purging Bypass	60								
CONTROL	Geno Bearing A Temp	77 °C							Main FCV Command	51.0 %					Purging Boiler	190								
	Geno Bearing B Temp	66 °C							Main FCV Feedback	51.0 %					Ignition Permission									
Alarm Buffer	Turbine Bearing A Temp	92 °C							Gas Flow Meter	1169 kg/h					Ignition Lightoff	2								
Alarm & Event	Turbine Bearing B Temp	86 °C							Gas Total	12909741 kg					Accel %66	51								
Pending Alarms	Lube Oil Pres	4.32 Bar							Gas Pressure	14.24 Bar					Accel %90	43								
	Lube Oil Temp	58.1 °C							Gas Concentration	0.0 %					Adjust Rated	20								
Alarm Status	Container Temp	33 °C							Control Room Temp	22 °C					Start CMD									
RESET									Synch Bias	-0.00 V					Ready to Load	223								

Resim 4.2 Türbin kontrol ekranı

Resim 4.2’de paylaştığım türbin giriş havası(T1) 16 °C ve yanma odası T5 sıcaklığında olup 4716 kW elektrik üretimi gerçekleştirebilmektedir.

Çizelge 4.1 Türbin Kontrol Paneli Fark Verileri

Değerler	Türbin giriş havası (T1)	Elektrik üretimi (kW)
Değer 1	9,8 °C	5034 kW
Değer 2	16 °C	4716 kW
Fark	6,2 °C	318 kW
Fark %	%-38,75 sıcaklık düşüşü	%6,74 üretim artışı

Çizelge 4.1’de karşılaştırılan 2 veri için 6,2 °C sıcaklık düşümü türbin elektrik üretiminde anlamlı bir artış göstermiştir. 318 kW güç üretim kazancı ve başka bir boyuttan bakınca aslında kapasiteyi arttırmış oluyoruz. 16 °C sıcaklıkta 4716 kW civarında daha fazla bir üretim şansımız olmayacaktı. Giriş havası soğutularak türbinin dinamiklerini arttırarak güç kazancı sağlamış olduk.

Öncesinde bahsetmiş olduğumuz Çizelge 4.2’deki 174 adet verinin regresyon analizini gerçekleştirdik. Bu veriler türbin yanma odası(T5) maksimum sıcaklığında alınmış ve farklı sıcaklıklardaki türbin giriş havası(T1) ile aktif güç üretimi incelenmiştir.

Çizelge 4.2 Türbin Sıcaklık, Elektrik Üretim(kW) ve PCD Verileri

Verinin Alındığı Tarih Saat	Aktif Güç (kW)	Türbin giriş havası (T1)	PCD (Bar)	Yanma Odası Sıcaklığı(T5)
1.06.2022 00:00	4612	19,6	10,1	677
1.06.2022 06:00	4728	15,5	10,2	677
2.06.2022 10:00	4569	20	10,04	677
2.06.2022 12:00	4333	28,4	9,73	677
2.06.2022 14:00	4561	20	9,99	677
2.06.2022 18:00	4640	17,4	10,13	677
2.06.2022 20:00	4688	15,3	10,25	677
3.06.2022 00:00	4660	16	10,1	677
3.06.2022 02:00	4704	14,7	10,24	677
4.06.2022 12:00	4631	17,3	10,15	677
4.06.2022 14:00	4641	17,2	10,14	677
4.06.2022 22:00	4270	31,4	9,69	677
5.06.2022 02:00	4351	25,2	9,84	677

Çizelge 4.2 (Devam) Türbin Sıcaklık, Elektrik Üretim(kW) ve PCD Verileri

Verinin Alındığı Tarih Saat	Aktif Güç (kW)	Türbin giriş havası (T1)	PCD (Bar)	Yanma Odası Sıcaklığı(T5)
5.06.2022 04:00	4555	19	10,04	677
5.06.2022 06:00	4581	19	10,06	677
5.06.2022 12:00	4589	19,1	10,08	677
5.06.2022 14:00	4610	18,5	10,11	677
5.06.2022 18:00	4673	16	10,18	677
5.06.2022 20:00	4671	16,3	10,17	677
6.06.2022 16:00	4871	13,1	10,44	677
6.06.2022 18:00	4950	11	10,58	677
6.06.2022 20:00	4983	10,6	10,61	677
6.06.2022 22:00	4990	10,3	10,63	677
7.06.2022 00:00	5098	9,1	10,72	677
7.06.2022 02:00	4648	16,7	10,1	677
7.06.2022 06:00	4661	16,4	10,15	677
7.06.2022 08:00	4663	15,9	10,17	677
8.06.2022 12:00	4774	17,4	10,33	677
8.06.2022 20:00	4877	14,2	10,45	677
8.06.2022 22:00	4890	14,2	10,4	677
9.06.2022 02:00	4824	16	10,36	677
9.06.2022 06:00	4688	19	10,21	677
9.06.2022 22:00	4534	24,7	9,99	677
10.06.2022 02:00	4665	19,7	10,21	677
10.06.2022 04:00	4785	16,5	10,33	677
10.06.2022 06:00	4776	16,6	10,34	677
10.06.2022 08:00	4777	16,4	10,34	677
10.06.2022 10:00	4834	14,8	10,4	677
10.06.2022 12:00	4793	15,9	10,34	677
10.06.2022 20:00	4443	25,2	9,95	677
11.06.2022 02:00	4537	23,4	10,03	677
11.06.2022 04:00	4755	16,6	10,29	677
11.06.2022 10:00	4779	15,7	10,22	677
11.06.2022 12:00	4736	16,8	10,26	677

Çizelge 4.2 (Devam) Türbin Sıcaklık, Elektrik Üretim(kW) ve PCD Verileri

Verinin Alındığı Tarih Saat	Aktif Güç (kW)	Türbin giriş havası (T1)	PCD (Bar)	Yanma Odası Sıcaklığı(T5)
11.06.2022 14:00	4726	16,9	10,24	677
11.06.2022 16:00	4724	16,5	10,26	677
11.06.2022 18:00	4800	14,9	10,32	677
11.06.2022 20:00	4749	16,3	10,24	677
12.06.2022 14:00	4364	28,3	9,75	677
14.06.2022 08:00	4331	31,1	9,7	677
14.06.2022 10:00	4363	28,8	9,7	677
14.06.2022 14:00	4418	26,7	9,8	677
14.06.2022 18:00	4828	14,2	10,39	677
14.06.2022 20:00	4783	15,4	10,33	677
15.06.2022 06:00	4851	14	10,4	677
15.06.2022 14:00	4756	16,1	10,29	677
15.06.2022 16:00	4782	15	10,34	677
15.06.2022 20:00	4923	11,7	10,51	677
15.06.2022 22:00	4770	14,8	10,31	677
16.06.2022 12:00	4338	29,2	9,74	677
16.06.2022 14:00	4296	30	9,71	677
16.06.2022 16:00	4290	30,6	9,7	677
16.06.2022 18:00	4306	29,4	9,72	677
16.06.2022 22:00	4575	21,6	10	677
17.06.2022 00:00	4663	18,5	10,15	677
17.06.2022 04:00	4649	18	10,17	677
17.06.2022 08:00	4531	21,9	9,98	677
17.06.2022 10:00	4497	22,2	9,99	677
17.06.2022 14:00	4509	23,6	9,92	677
17.06.2022 16:00	4459	23,9	9,92	677
17.06.2022 20:00	3919	41,2	9,15	677
17.06.2022 22:00	3950	39,1	9,22	677
18.06.2022 00:00	3980	38,3	9,25	677
18.06.2022 02:00	4022	37,6	9,28	677
18.06.2022 04:00	4068	37	9,3	677

Çizelge 4.2 (Devam) Türbin Sıcaklık, Elektrik Üretim(kW) ve PCD Verileri

Verinin Alındığı Tarih Saat	Aktif Güç (kW)	Türbin giriş havası (T1)	PCD (Bar)	Yanma Odası Sıcaklığı(T5)
18.06.2022 10:00	4158	34,9	9,37	677
18.06.2022 12:00	4186	34	9,4	677
18.06.2022 14:00	4258	33,2	9,43	677
18.06.2022 16:00	4214	32,7	9,45	677
18.06.2022 18:00	4690	17,6	10,15	677
18.06.2022 20:00	4705	17,4	10,16	677
18.06.2022 22:00	4690	17,4	10,16	677
19.06.2022 00:00	4700	17,1	10,18	677
19.06.2022 02:00	4685	17	10,16	677
19.06.2022 04:00	4895	12,3	10,49	677
19.06.2022 06:00	4931	11,4	10,53	677
19.06.2022 08:00	4935	11,3	10,55	677
19.06.2022 10:00	5007	10,1	10,64	677
19.06.2022 12:00	4995	10,2	10,64	677
19.06.2022 14:00	5040	9,5	10,69	677
19.06.2022 16:00	5076	9,2	10,71	677
19.06.2022 18:00	4646	18	10,15	677
19.06.2022 20:00	4698	17,3	10,19	677
19.06.2022 22:00	4692	16,7	10,21	677
20.06.2022 02:00	4759	15,6	10,2	677
20.06.2022 04:00	4736	15	10,2	677
20.06.2022 06:00	4737	15,5	10,25	677
20.06.2022 08:00	4710	15,8	10,22	677
20.06.2022 10:00	4675	17,2	10,15	677
20.06.2022 12:00	4333	28	9,72	677
20.06.2022 14:00	4294	29	9,67	677
20.06.2022 16:00	4284	29,5	9,65	677
21.06.2022 00:00	4440	23,9	9,87	677
21.06.2022 02:00	4444	23,9	9,8	677
21.06.2022 04:00	4655	17	10,13	677
21.06.2022 22:00	4436	23,6	9,84	677

Çizelge 4.2 (Devam) Türbin Sıcaklık, Elektrik Üretim(kW) ve PCD Verileri

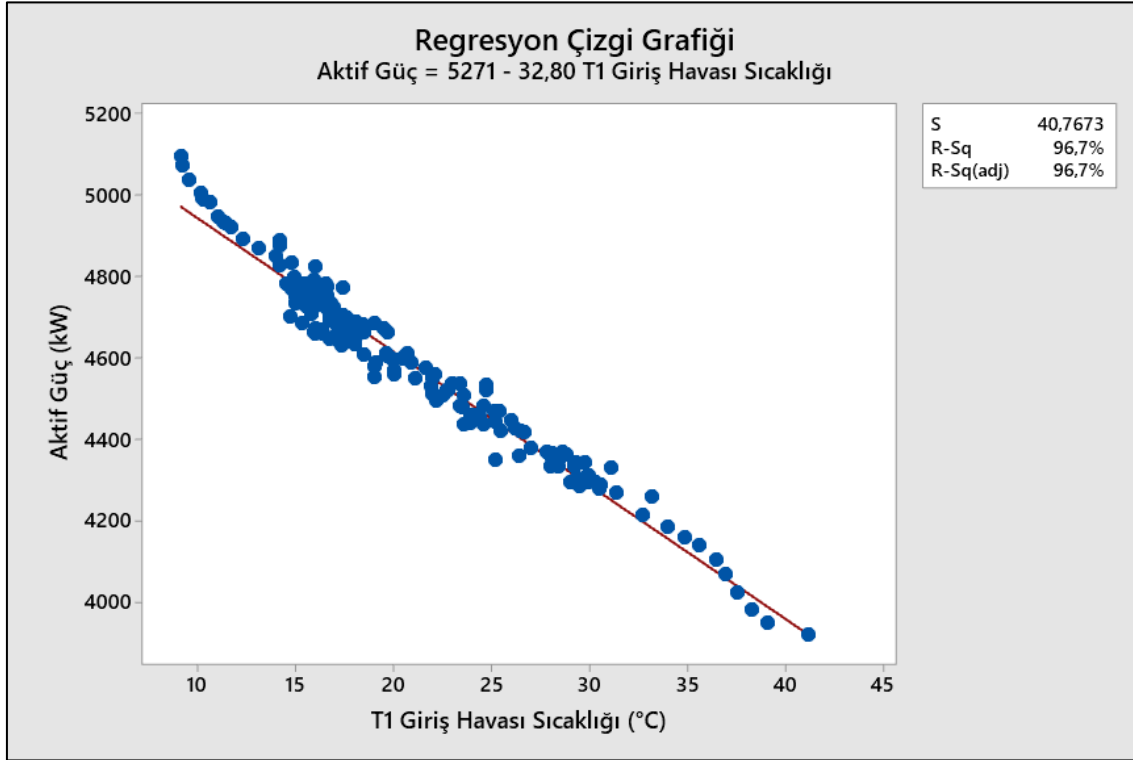
Verinin Alındığı Tarih Saat	Aktif Güç (kW)	Türbin giriş havası (T1)	PCD (Bar)	Yanma Odası Sıcaklığı(T5)
22.06.2022 02:00	4479	23,5	9,87	677
22.06.2022 06:00	4483	23,4	9,9	677
22.06.2022 12:00	4700	16,7	10,18	677
22.06.2022 14:00	4730	16	10,21	677
22.06.2022 16:00	4776	14,8	10,26	677
22.06.2022 18:00	4784	14,5	10,28	677
23.06.2022 04:00	4723	16,7	10,21	677
23.06.2022 06:00	4726	16,8	10,2	677
23.06.2022 08:00	4658	17,8	10,17	677
23.06.2022 12:00	4422	26,5	9,83	677
23.06.2022 14:00	4365	28,1	9,8	677
23.06.2022 16:00	4295	30,3	9,68	677
23.06.2022 18:00	4278	30,5	9,67	677
23.06.2022 20:00	4470	25,1	9,9	677
24.06.2022 04:00	4683	18,4	10,1	677
24.06.2022 06:00	4672	19,5	10,08	677
24.06.2022 08:00	4669	18	10,15	677
24.06.2022 10:00	4684	17,4	10,18	677
24.06.2022 12:00	4670	18	10,14	677
24.06.2022 14:00	4691	18,1	10,13	677
25.06.2022 16:00	4312	29,9	9,69	677
25.06.2022 18:00	4549	21,1	10,02	677
25.06.2022 20:00	4636	18	10,11	677
26.06.2022 10:00	4666	18,2	10,13	677
26.06.2022 12:00	4369	27,8	9,76	677
26.06.2022 14:00	4600	19,9	10,08	677
26.06.2022 16:00	4603	20,5	10,08	677
26.06.2022 18:00	4588	20,9	10,06	677
27.06.2022 02:00	4753	15	10,27	677
27.06.2022 04:00	4752	15	10,27	677
27.06.2022 06:00	4741	15,7	10,26	677

Çizelge 4.2 (Devam) Türbin Sıcaklık, Elektrik Üretim(kW) ve PCD Verileri

Verinin Alındığı Tarih Saat	Aktif Güç (kW)	Türbin giriş havası (T1)	PCD (Bar)	Yanma Odası Sıcaklığı(T5)
27.06.2022 12:00	4349	28,4	9,76	677
27.06.2022 14:00	4344	29,3	9,74	677
27.06.2022 16:00	4342	29,8	9,6	677
27.06.2022 18:00	4380	27	9,8	677
27.06.2022 20:00	4429	26,2	9,85	677
27.06.2022 22:00	4481	24,6	9,91	677
28.06.2022 00:00	4520	24,7	9,9	677
28.06.2022 02:00	4521	22,7	10	677
28.06.2022 04:00	4536	23	9,95	677
28.06.2022 06:00	4520	22,8	10	677
28.06.2022 08:00	4469	25,4	9,89	677
28.06.2022 10:00	4368	28,6	9,77	677
28.06.2022 12:00	4334	29,2	9,73	677
28.06.2022 14:00	4310	30	9,72	677
28.06.2022 18:00	4550	22	9,9	677
28.06.2022 20:00	4611	20,7	10	677
28.06.2022 22:00	4598	20,5	10,06	677
29.06.2022 00:00	4596	20	10,06	677
29.06.2022 04:00	4607	19,7	10,07	677
29.06.2022 16:00	4561	22,1	10	677
29.06.2022 18:00	4731	16,4	10,2	677
29.06.2022 20:00	4700	17,6	10,15	677
29.06.2022 22:00	4660	18	10,1	677
30.06.2022 00:00	4654	18,1	10,14	677
30.06.2022 08:00	4422	25,5	9,83	677
30.06.2022 10:00	4352	28,1	9,72	677
30.06.2022 12:00	4360	26,4	9,78	677
30.06.2022 14:00	4457	24,4	9,85	677
30.06.2022 16:00	4461	24,2	9,8	677
30.06.2022 18:00	4436	24,6	9,85	677
30.06.2022 20:00	4511	22	9,9	677

Çizelge 4.2 (Devam) Türbin Sıcaklık, Elektrik Üretim(kW) ve PCD Verileri

Verinin Alındığı Tarih Saat	Aktif Güç (kW)	Türbin giriş havası (T1)	PCD (Bar)	Yanma Odası Sıcaklığı(T5)
30.06.2022 22:00	4510	22,5	9,92	677



Şekil 4.2 Aktif Güç/T1 Sıcaklığı regresyon grafiği

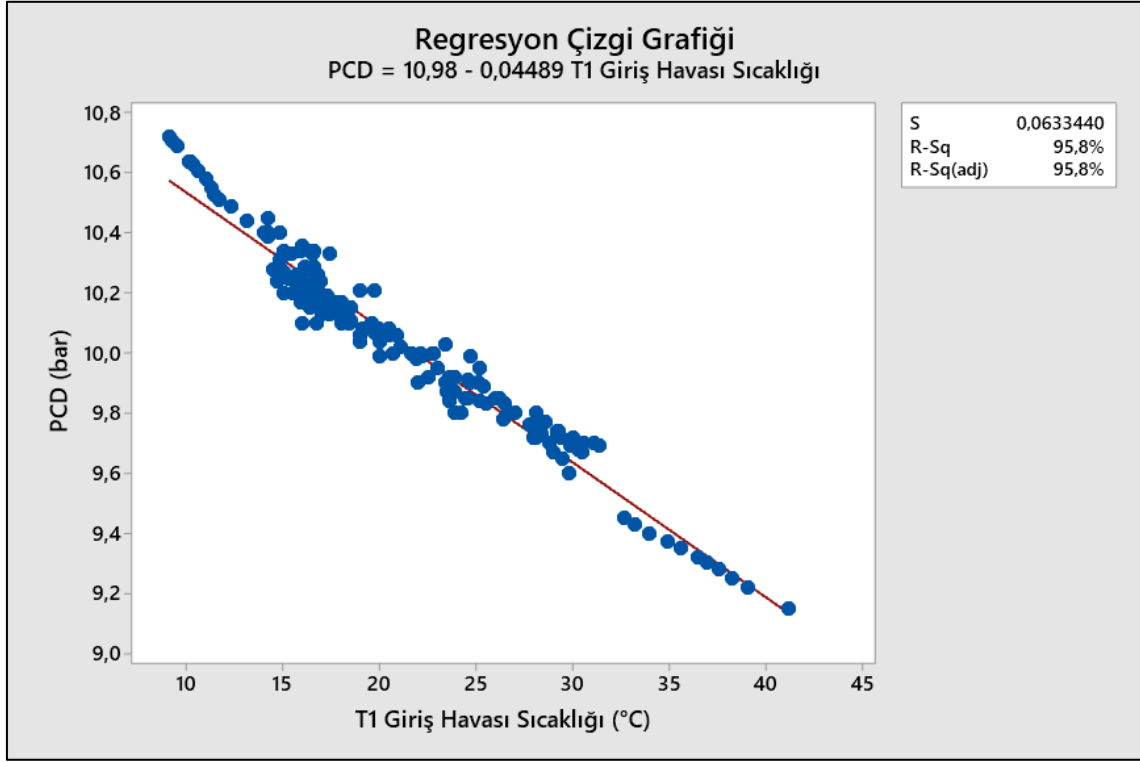
174 adet türbin giriş havasına göre elektrik üretim miktarı verilerinin Şekil 4.2’de olan regresyon grafiği uyumlu görünmektedir. Türbin giriş havası sıcaklığının soğutulması ile elektrik aktif güç üretim artışı %96,7 uyumla doğrulanmıştır. Burada bağımlı değişken aktif güç olurken bağımsız değişken T1 türbin giriş havası sıcaklığıdır.

Yapılan regresyon analizinin sonucunda aşağıda belirtilen formül oluşmuştur.

$$\text{Aktif Güç} = 5271,2 - 32,797 \cdot (\text{T1 Giriş Havası Sıcaklığı}) \quad (4.7)$$

Ayrıca türbin giriş havası sıcaklığı ile PCD basıncı arasında da bir ilişki olduğunu gözlemledik. Bu ilişkinin anlamlı olup olmadığını anlayabilmek için türbin giriş havası

sıcaklığı ile PCD verilerini regresyon analizi test edeceğiz. PCD ise kompresörün havayı sıkıştırıp yanma odasına gönderdiği basınç değerini ifade eder. Bu değer türbin giriş havası artışıyla düşüş göstermektedir.



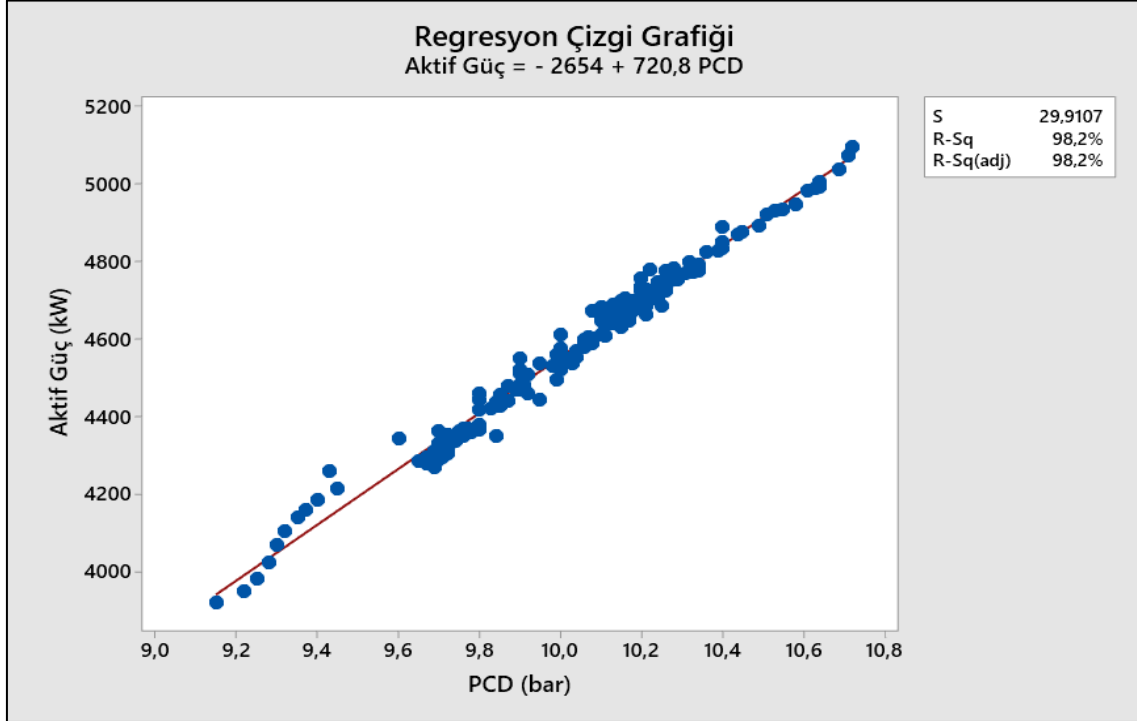
Şekil 4.3 PCD/T1 Sıcaklığı regresyon grafiği

Yapılan Şekil 4.3'te olan regresyon analizi ile gaz türbini kompresörü giriş havasının soğutulmasının PCD yani kompresör çıkış basıncını arttırdığı ilişkisini %95,8 uyum ile söyleyebiliriz. Kompresör basıncı 9,1 °C ile 41,2 °C sıcaklıklar arasında 10,72 bar ile 9,15 bar arasında değişim göstermektedir. Burada bağımlı değişken PCD olurken bağımsız değişken T1 türbin giriş havası sıcaklığıdır.

PCD ile T1 giriş havası sıcaklığının regresyon formülü aşağıdaki formüldür.

$$PCD = 10,98 - 0,04489 \cdot (T1 \text{ Giriş Hava Sıcaklığı}) \quad (4.8)$$

Türbin giriş havası, PCD ve aktif güç arasında doğrudan bir ilişki vardır. Bu ilişkiyi anlamlandırabilmek için farklı bir bakış açısı ile PCD ve aktif güç değişimini inceledik.



Şekil 4.4 Aktif Güç/PCD regresyon grafiği

Şekil 4.4'te görülen kompresör basıncının artışı aktif gücü de arttırdığını %98,2 uyum ile söyleyebiliriz. Burada bağımlı değişken aktif güç olurken bağımsız değişken ise PCD verisidir.

Türbin giriş havasının soğutulmasıyla ilgili yapılmış (Kwon vd. 2018, Dizaji ve Pourhedayat 2019, Demiral 2019, Al-Affas 2016, Ünver ve Kılıç 2005, Effiom vd. 2019), bazı literatür çalışmalarında daha çok giriş havası sıcaklığının aktif güç üretimine etkisi ele alınmıştır. Yapmış olduğum çalışmada PCD olarak tanımlanan kompresör çıkış basıncının da doğrudan etkili olduğunu tespit edip gerekli verileri ve bulguları literatüre sağladım.

Bağımlı değişkeni aktif güç olarak ve iki adet bağımsız değişken olarak PCD ve T1 giriş havası sıcaklığını aldığımızda aralarında Şekil 4.5'te görüldüğü üzere %98,6 uyum olduğunu saptadık.

Model Özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
26,1618	98,66%	98,64%	98,60%

Şekil 4.5 Aktif güç, PCD ve T1 regresyon model özeti

Aktif güç, PCD ile T1 giriş havası sıcaklığının regresyon formülü aşağıdaki formüldür.

$$\text{Aktif Güç} = -161 + 494,6 \text{ PCD} - 10,60 \cdot T1 \text{ Giriş Havası Sıcaklığı} \quad (4.9)$$

Alınan verileri incelediğimizde 9,1 °C’de 5098 kW aktif güç üretimi ve PCD basıncı 10,72 bar olarak gözlemlenmiştir. 41,2 °C’de 3919 kW aktif güç üretimi ve PCD basıncı 9,15 bar olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.3 Türbin Giriş Havası ve Aktif Güç Üretimi Fark Verileri

Değerler	Türbin giriş havası (T1)	Elektrik üretimi (kW)
Değer 1	9,1 °C	5098 kW
Değer 2	41,2 °C	3919 kW
Fark	32,1 °C	1179 kW
Fark %	%-77,91 sıcaklık düşüşü	%30,08 üretim artışı

Çizelge 4.3’den anladığımız üzere türbin giriş havasını 41,2 °C’den 9,1 °C’ye soğuttuğumuzda türbinden elde edeceğimiz elektrikselsel aktif güç çıkışında 1179 kW bir artış sağlayabiliyoruz.

Çizelge 4.4 Türbin Giriş Havası Sıcaklığı ve PCD Fark Verileri

Değerler	Türbin giriş havası (T1)	PCD
Değer 1	9,1 °C	10,72 bar
Değer 2	41,2 °C	9,15 bar
Fark	32,1 °C	1,57 bar
Fark %	%-77,91 sıcaklık düşüşü	%17,16 basınç artışı

Çizelge 4.4’te görüldüğü üzere türbin giriş havası sıcaklığını 41,2 °C’den 9,1 °C’ye soğuttuğumuzda türbinden elde edeceğimiz PCD 1,57 bar artmaktadır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Türbin giriş havasının soğutulmasıyla elde edilen enerji verimliliği artışı, enerji üretim sürecinde çeşitli avantajlar sağlar. Öncelikle, daha fazla enerji üretimi gerçekleşir. Soğutulan havanın yoğunluğunun artması ve yakıtın daha verimli yanması, daha fazla güç üretilmesini sağlar. Bu, aynı kapasitedeki gaz türbiniyle daha fazla elektrik enerjisi elde etmek anlamına gelir.

İkinci olarak, türbin giriş havasının soğutulması, enerji üretim sürecindeki kayıpları azaltır. Genleşme etkisinin azalması ve daha verimli yanma, enerji kayıplarını minimize eder. Bu da tesisin enerji verimliliğini artırır ve daha sürdürülebilir bir enerji üretimi sağlar.

Yaptığımız bu çalışmada 5,2 MW'lık Solar Turbines Taurus 60 model bir gaz türbini ile türbin giriş havasının soğutulması ile elektrik üretiminde kayda değer bir artış sağlandığı sonucuna vardık.

174 adet farklı veri ile değişken türbin giriş havası sıcaklıklarındaki elektrik üretimlerini regresyon analizi ile analiz ettik. 41,2 °C'den 9,1 °C'ye, 3919 kW ve 5098 kW arası alınmış olan verilerin regresyon analizi sonucunda soğutulan türbin giriş havasının elektrik üretiminde %96,7 uyumla artış sağladığını söyleyebiliriz.

41,2 °C türbin giriş havası sıcaklığında maksimum yanma odası sıcaklığında 3919 kW elektrik üretimi gerçekleştirebilirken 41,2 °C'lik türbin giriş havası sıcaklığını soğutarak 9,1 °C'ye düşürdüğümüzde maksimum yanma odası sıcaklığı olan 677 °C'de 5098 kW'lık aktif güç elektrik üretimini gerçekleştirdik.

Türbin giriş havasının 32,1 °C soğutulması ile 3919 kW elektrik üretiminden 5098 kW'lık elektrik üretimine artış sağlanmış olup %30,08'lik elektrik üretim artışı gerçekleşmiştir.

Türbin giriş havasının soğutulması ile PCD olarak tanımladığımız kompresör çıkış basıncında da artış sağlandığı tespit edilmiştir. PCD basıncı 41,2 °C'de 9,15 bar iken

32,1°C'lik bir soğutma sağlanarak türbin giriş havası 9,1 °C'ye düştüğünde 10,72 bar olarak %17,16'lık basınç artışı sağlanmıştır. Ayrıca elde ettiğimiz verilerle türbin giriş havasının değişimine göre PCD basınç değişiminin regresyon analizini de gerçekleştirdiğimizde giriş havasının soğutulmasının PCD basıncını %95,8 uyumla arttırdığını söyleyebiliriz.

PCD basınç artışı ile elektrik üretim artışında doğrudan bir ilişki olduğu sonucuna da bu şekilde varmış olduk. Yaptığımız regresyon analizi de %98,2 uyumla bu sonucu destekler niteliktedir.

Sonuç olarak trijenerasyon santrallerinde kullanılan gaz türbinlerinin giriş havasının soğutulmasıyla, PCD basıncında %17,16 ve elektrik üretiminde %30,08 oranında artış sağlandığı %98,6 regresyon analizi uyumu ile görülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Agbadede R, Kainga B, 2021, Performance and Techno-economic Analysis of Inlet Fogging System Implementation In Heavy Duty Industrial Gas Turbines, International Journal of Thermodynamics, 24, 75-81.
- Akbari A D, Mahmoudi S M S, 2014, Thermoeconomic Analysis and Optimization of the Combined Supercritical CO₂ Recompression Brayton-organic Rankine Cycle, Energy, 78, 501-512.
- Al-Affas R, 2016, Evaluation the Impact of Using Different Cooling Technologies on Power Boosting of The Gas Turbine Unit in Duhok Power Station–Iraq, Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 92s, Ankara.
- Al-Fahed S F, Alasfour F N, Abdulrahim H K, 2009, The Effect of Elevated Inlet Air Temperature and Relative Humidity on Cogeneration Systems, International Journal of Energy Research, 33, 1384-1394.
- Ashley S D, Sarim A, 2011, Gas Turbine Performance At Varying Ambient Temperature, Applied Thermal Engineering, 31, 2735-2739.
- Bolatturk A, Coskun A, Geredelioglu C, 2015, Thermodynamic and Exergoeconomic Analysis of Çayırhan Thermal Power Plant, Energy Conversion and Management, 101, 371-378.
- Çamdalı Ü, 2012, Termodinamik ve Sosyal Sistemlerin Yakın Çevre İlişkilerindeki İlginç Benzeşim Değişim ve Bir Sonuç-Bir Ümit, Ankara Üniversitesi SBF Dergisi, 67, 213-221.
- Çetin B, 2017, Basit Brayton Çevriminde Elektrik Üretimi Maliyetinin Parametrik Analizi, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29, 1-8.
- Çiftkaya B, 2010, Elektrik Üretiminde Kullanılan Gaz Türbinlerinin İncelenmesi ve Benzetimi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 129s, İstanbul.

- Demirel E, 2019, Gaz Türbini Giriş Havaasının Absorbsiyonlu Chiller İle Soğutulmasının Gaz Türbini Performansına Etkisi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 55s, Kocaeli.
- Dizaji H S, Pourhedayat S, 2019, Using Novel Integrated Maisotsenko Cooler and Absorption Chiller for Cooling of Gas Turbine Inlet Air, Energy Conversion and Management, 195, 1067-1078.
- Effiom S, Agwu O, Oboh A, 2019, Economic Evaluation of Mechanical Chiller For Power Recovery In A Gas Turbine Unit In Nigeria, European Journal of Engineering and Technology, 7, 6-17.
- Erdem H, 2009, Thermodynamic and Economic Assessments of Gas Turbine Inlet Air-Cooling By Evaporative Technique, International Journal of Exergy, 6, 605-619.
- Farzaneh-Gord M, Deymi-Dashtebayaz M, 2009, A New Approach For Enhancing Performance of a Gas Turbine(Case Study: Khangiran Refinery), Applied Energy, 86, 2750-2759.
- Ibrahim T R, Mustafizur M, Abdalla A N, 2012, Improvement of Gas Turbine Performance Based on Inlet Air Cooling Systems: A Technical Review, International Journal of Physical Sciences, 6, 620-627.
- Kakaras E, Doukelis A, Karellas S, 2004, Compressor Intake-air Cooling In Gas Turbine Plants, Energy, 29, 2347-2358.
- Kamal O, Salim D A, Fouzi M S M, Khai D T H, Yusof M K Y, 2017, Feasibility Study of Turbine Inlet Air Cooling Using Mechanical Chillers In Malaysia Climate, Energy Procedia, 138, 558-563.
- Kandemir P, 2019, Çok Amaçlı Enerji Kullanımının Analizi ve Uygulanması, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 94s, Bursa.
- Karaali R, Keven A, 2022, Exergy Analysis of Inlet Air Absorption Cooling Effects on Basic Cogeneration Systems, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 97-103.
- Karaali R, Öztürk İ T, 2017, Çevre Şartlarının Gaz Türbinli Kojenerasyon Çevrimlerinin Performansı Üzerine Etkileri, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 37, 93-102.

- Kareem A F, 2023, Thermodynamic and Exergo-economic Analysis of a Combined Power Plant on Gas Turbine Cycle and Organic Rankine Cycle, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 83s, Karabük.
- Kutbi J F, Georgiou I, 2022, Enhancing Power Generation Utilizing Turbine Inlet Air Cooling, Society Of Petroleum Engineers, SPE-211308-MS.
- Kwon H, Kim T S, Sohn J L, Kang D, 2018, Performance Improvement of Gas Turbine Combined Cycle Power Plant by Dual Cooling of The Inlet Air and Turbine Coolant Using an Absorption Chiller, Energy, 163, 1050-1061.
- Lee J, Yuvamitra K, Guiberteau K, Kozman T A, 2014, Six-sigma Approach to Energy Management Planning, Strategic Planning For Energy and the Environment, 33, 23-40.
- Nalbur B E, Yavaş Ö, 2023, Otomotiv Endüstrilerinde ISO 50001 Enerji Yönetim Sisteminin Enerji Performansına Etkisi, International Journal of Management and Administration, 7, 21-35.
- Özdemir E, 2017, Bir Gaz Türbini Çevriminin Termodinamik Analizi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 74s, Tekirdağ.
- Taştan M, 2011, Gaz Türbinli Motorlarda Kompresör İşletme Şartlarının Kompresör Verimine Etkisinin Araştırılması, Erciyes Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, Yüksek Lisans Tezi, 57s, Kayseri.
- Toprak S, 2007, Gaz Türbin Kanatlarının Soğutulmasının Önemi ve Soğutma Yöntemlerinin İncelenmesi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 79s, Trakya.
- Tufan F, 2013, Senkron Jeneratör Statik İkaz Sisteminin Modellenmesi ve Şebeke Kararlılığına Etkilerinin İncelenmesi, Tunceli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 151s, Tunceli.
- Uçmaz M İ, 2008, Enerji Santrallerinde Maksimum Güç Eldesi İçin Senkron ve Asenkron Jeneratör Kullanımının Karşılaştırılması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s, İstanbul.
- Uzun A, Değirmen M, 2018, Endüstriyel İşletmelerde Enerji Verimliliği ve Enerji Yönetimi, Uluslararası Ekonomik Araştırmalar Dergisi, 4, 83-97.

- Ünver Ü, Kılıç M, 2005, Çevre Sıcaklığının Bir Kombine Çevrim Güç Santralinin Performansına Etkisi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 10, 49-58.
- Yıldırım A, 2022, Kamu Kurumlarında ISO 50001 Enerji Yönetim Sisteminin Kurulması: Selçuk Üniversitesi Örneği, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 118s, Konya.
- Yıldız C, Gani A, Keçecioğlu Ö F, Açıkgöz H, Şekkeli M, 2016, Bir Kojenerasyon Tesisinin Verimlilik Yönünden İncelenmesi: Kahramanmaraş Örnek Çalışması, International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences, 916-919.
- Yılmazoğlu M Z, Rahim M A, 2010, Gaz Türbinli Santrallerde Çevre Sıcaklığı ve Basıncının Santral Performansına Etkileri, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25, 495-503.
- Yoldaş Y B, 2011, Güç Transformatörleri ve Harmoniklerin İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 120s, İstanbul.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://www.epdk.gov.tr/Detay/DownloadDocument?id=fUqcm0u5qg0=>, 05.06.2023
- 2- <https://www.aksa.com.tr/tr-tr/kojenerasyon-trijenerasyon>, 05.06.2023
- 3- <https://kojenturk.org/tr/kojenerasyon-nedir-15>, 05.06.2023
- 4- <https://www.britannica.com/technology/electric-generator>, 05.06.2023
- 5- <https://onlineexamguide.com/synchronous-generator-construction-working-principle/>, 05.06.2023
- 6- https://energyeducation.ca/encyclopedia/Gas_turbine, 05.06.2023
- 7- <https://soaneemrana.org/onewebmedia/ELEMENTS%20OF%20GAS%20TURBINE%20PROPULTION2.pdf>, 05.06.2023
- 8- <https://www.enerjisistemlerimuhendisligi.com/gaz-turbini/3502/>, 05.06.2023
- 9- <https://kojenturk.org/uploads/dokumanlar/Erhan%20TALAZ-%205.12.18%20TEKSAN-Kojenerasyon%20Sistem%20Bilesenleri%20ve%20Uygulamalari.pdf>, 05.06.2023
- 10- https://www.solarturbines.com/en_US/products/power-generation-packages/taurus-60.html#tabs-9ca438aeaa-item-fbded0ef9f-tab, 05.06.2023
- 11- <https://docplayer.biz.tr/136999349-Senkron-makineler-giris.html>, 05.06.2023
- 12- <https://youtu.be/N1FAw0Ff4Ac>, 05.06.2023