



**GAZ TÜRBİNİ PERİYODİK BAKIMLARININ SİSTEM
PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Orhan Özay KÖSE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2024

ETİK BEYAN

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

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

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

Orhan Özay KÖSE

17/07/2024

GAZ TÜRBİNİ PERİYODİK BAKIMLARININ SİSTEM PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Orhan Özay KÖSE

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Gaz türbinlerinin elektrik üretiminde ve kojenerasyon sistemlerinde kullanımı oldukça yaygındır. Günümüzde enerji talebinin gelişen ekonomi ve sanayi ile birlikte gün geçtikçe artması enerji arz güvenliğinin önemini de büyük oranda artırmaktadır. Enerji arz güvenliğini sağlamak amacıyla, elektrik üreten tesislerde sürekli ve belirli performans değerlerinde kesintisiz ve kaliteli bir enerji sağlamak için kullanılan gaz türbinlerinin periyodik bakımlarının zamanında yapılması önem arz etmektedir. Bu periyodik bakımların önceden belirlenmiş bir eşdeğer işletme saatinde (EOH) yapılması gerekmektedir. Yapılan periyodik bakımlar sonucunda gaz türbinlerinin sürdürülebilir çalışma koşulları ve istenilen performans değerlerinde kesintisiz enerji üretimlerinin sağlanması büyük oranda güvence altına alınmaktadır. Bu çalışmada, gaz türbinlerinin çalışma prensibi, tarihsel gelişimi, sınıflandırılması, bileşenleri, gaz türbinlerindeki degradasyon faktörleri ve periyodik bakımlar hakkında kapsamlı bir bilgilendirme yapılmıştır. Gaz türbinlerinde, özellikle türbin giriş havasından kaynaklanan, filtre sisteminde meydana gelen kirlenmenin sistem çalışma performansına etkileri incelenerek filtre değişim periyotlarının maliyet analizi yapılmıştır. Bu çalışmada değerlendirilmek üzere, Türkiye'de kurulu bulunan bir gaz türbinli kombine çevrim santrali örnek olarak ele alınmıştır. Türbin giriş havası filtre sistemindeki basınç farkının (Δp) türbin işletme saatinde (OH) göre değişim profili oluşturularak, basınç farkının $\Delta p=15$ mbar değerine kadar artışının giriş hava debisi, yakıt tüketimi, türbin çıkış gücü, ısı oranı ve verim üzerindeki etkileri incelenmiştir. Türbin giriş havasındaki basınç farkı artışının sistem performansına etkileri yönünden filtre değişiminin maliyet analizi yapıldığında, belirlenen koşullar altında, her 2500 işletme saatinde (OH) ve basınç farkının $\Delta p=5$ mbar değerine ulaştığında filtrelerin yenilenmesinin maliyet yönünden optimum seçenek olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca gaz türbininde yapılan C tipi bakım kapsamında tespit edilen bulgulara yönelik uygulanan işlemlerin gaz türbinindeki degradasyon etkilerini azaltarak bir sonraki bakıma kadar emre amadelikte ve güvenilirlikte önemli bir artış sağlayacağı öngörülmektedir.

Bilim Kodu : 91408

Anahtar Kelimeler : Gaz türbini, Periyodik bakım, Muayene, Sistem performansı, Hava giriş filtresi

Sayfa Adedi : 119

Danışman : Prof. Dr. M. Zeki YILMAZOĞLU

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF GAS TURBINE PERIODIC
MAINTENANCE ON SYSTEM PERFORMANCE

(M. Sc. Thesis)

Orhan Özay KÖSE

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2024

ABSTRACT

Gas turbines are widely used in electricity generation and cogeneration systems. Today, energy demand is increasing day by day with the developing economy and industry, which greatly increases the importance of energy supply security. In order to ensure energy supply security, it is important to carry out periodic maintenance of gas turbines used to provide uninterrupted and quality energy at continuous and certain performance values in electricity generating facilities on time. These periodic maintenances should be carried out within a predetermined equivalent operating hours (EOH). As a result of the periodic maintenance, sustainable working conditions of gas turbines and uninterrupted energy production at the desired performance values are largely ensured. In this study, a comprehensive information about the working principle, historical development, classification, components, degradation factors, and periodic maintenance of gas turbines is given. The effects of fouling in the filter system of gas turbines, especially caused by the turbine inlet air, on the operating performance of the system are examined and the cost analysis of filter replacement periods is performed. A gas turbine combined cycle power plant in Türkiye is taken as an example to be evaluated in this study. By profiling the variation of the differential pressure (Δp) in the turbine inlet air filter system according to the turbine operating hours (OH), the effects of the differential pressure increase up to $\Delta p=15$ mbar on inlet air flow rate, fuel consumption, turbine output power, heat rate and efficiency are analyzed. When the cost analysis of the filter replacement in terms of the effects of the differential pressure increase in the turbine inlet air on the system performance is performed, it is evaluated that under the specified conditions, replacement of the filters at every 2500 operating hours (OH) and when the differential pressure reaches $\Delta p=5$ mbar is the optimum option in terms of cost. In addition, it is predicted that the treatments applied for the findings detected within the scope of C type maintenance performed on the gas turbine will provide a considerable increase in availability and reliability until the next maintenance by reducing the degradation effects on the gas turbine.

Science Code : 91408

Key Words : Gas turbine, Periodic maintenance, Inspection, System performance, Air inlet filter

Page Number : 119

Supervisor : Prof. Dr. M. Zeki YILMAZOĞLU

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının başından sonuna kadar bana desteğini esirgemeyen, bana ilham veren, değerli bilgi ve tecrübesiyle beni her zaman cesaretlendiren ve yönlendiren saygıdeğer hocam, danışmanım Prof. Dr. M. Zeki YILMAZOĞLU'na en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ülkemizin ve milletimizin refahı için gece gündüz demeden çalışan, enerji arzı ve güvenliğini sağlamak için emek eden ve tez çalışmamda bana yardımlarını esirgemeyen başta EÜAŞ Tekirdağ Doğalgaz Kombine Çevrim A Santrali İşletme Müdürlüğü çalışanları ve yöneticileri olmak üzere EÜAŞ Genel Müdürlüğüne saygı ve şükranlarımı sunarım.

Enerji sektörünün yarım asırlık çınarı, ülkemizin ağır sanayi hamlesinin kalan son neferi, büyük projelerin çözüm ortağı ve görünmez kahramanı, bünyesinde görev yapmaktan gurur duyduğum, bugüne kadar elde ettiğim bilgi ve tecrübeye doğrudan ve dolaylı katkı sağlayan meslek ve hayat okulum TEMSAN A.Ş. Genel Müdürlüğüne minnet, saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bugünlere gelmemde emekleri büyük, destekleri sonsuz olan annem, babam, kardeşlerim ile dün, bugün ve daima yanımda olan, bana her zaman, her anımda destek veren, hayatımdaki tüm planlamaların koşulsuz, şartsız destekçisi, yön vereni ve yoldaşı değerli eşim Şule'ye en içten sevgi, saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. GAZ TÜRBİNLERİ	3
2.1. Genel	3
2.2. Gaz Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi	3
2.3. Gaz Türbinlerinin Sınıflandırılması	8
2.4. Gaz Türbinlerinin Temel Çalışma Prensipleri ve Çevrimler	9
2.4.1. Brayton çevrimi.....	10
2.4.2. Rejeneratif çevrim	13
2.4.3. Ara soğutmalı çevrim	15
2.4.4. Ara ısıtmalı çevrim.....	16
2.4.5. Ara soğutmalı, ara ısıtmalı ve rejeneratif çevrim.....	18
2.4.6. Buhar enjeksiyonlu çevrim.....	19
2.4.7. Evaporatif rejeneratif çevrim.....	21
2.4.8. Brayton-Rankine kombine çevrim	22
2.5. Gaz Türbini Ana Bileşenleri	24

	Sayfa
2.5.1. Hava giriş ve filtre sistemi	25
2.5.2. Kompresör.....	27
2.5.3. Ayarlanabilir giriş kılavuz kanatları (IGV).....	29
2.5.4. Yanma odası ve yakıcılar	30
2.5.5. EV (çevresel girdap) yakıcılar	33
3. GAZ TÜRBİNLERİNDE DEGRADASYON.....	35
3.1. Genel	35
3.2. Kirlenme (Fouling).....	36
3.2.1. Elle (manuel) temizleme.....	39
3.2.2. Aşındırıcı ile temizleme	39
3.2.3. Devre dışı (off-line) yıkama.....	40
3.2.4. Devrede (on-line) yıkama.....	40
3.3. Korozyon.....	41
3.4. Oksidasyon.....	42
3.5. Sıcak Korozyon	43
3.6. Sülfatlaşma (Sülfidasyon).....	44
3.7. Çukurcuk ve Aralık Korozyonu	44
3.8. Erozyon (Partiküle Bağlı Aşınma)	46
3.9. Abrazyon (Sürtünmeye Bağlı Aşınma).....	47
3.10. Parçacık Füzyonu	47
3.11. Mekanik Bozulma	48
4. GAZ TÜRBİNİ BAKIMLARI	49
4.1. Emre Amadelik ve Güvenilirlik	53
4.2. Gaz Türbini Muayene ve Bakım Tipleri	56

	Sayfa
4.2.1. Hazırda bekleme (stand-by) bakımı.....	57
4.2.2. Devrede muayene ve bakım	58
4.2.3. Yanma muayenesi ve bakımı (C tipi muayene ve bakım).....	59
4.2.4. Sıcak gaz yolu muayenesi ve bakımı.....	60
4.2.5. Majör (büyük) muayene ve bakım.....	61
4.2.6. Gaz türbini muayene ve bakım aralıkları	61
4.2.7. Faktörlü başlatma (FS) ve faktörlü saat (FH)	62
4.2.8. Eşdeğer işletme saati (EOH)	63
5. GAZ TÜRBİNİ C TİPİ BAKIM ÇALIŞMASI.....	65
5.1. Giriş.....	65
5.2. Bakım Öncesi ve Demontaj	66
5.2.1. Bakım öncesi yapılacaklar.....	66
5.2.2. Türbin demontajının kapsamı	66
5.3. Türbin Ekipmanında Yapılacak Ölçü, Kontrol, Muayene ve Bakım İşlemleri ..	67
5.3.1. Kompresör	67
5.3.2. Türbin	68
5.3.3. Yanma ünitesi.....	69
5.3.4. Türbin çıkışı	70
5.3.5. Yataklar	70
5.3.6. Kaplinler	71
5.3.7. Döndürme tertibatı (virör).....	71
5.3.8. Acil durdurma valfleri (ESV), kontrol valfleri (CV), sızdırmazlık ve drenaj valfleri	71
5.3.9. Yağlama sistemi, borular, pompalar ve motorlar.....	72

	Sayfa
5.3.10. Koruma ve kontrol sistemi	72
5.4. Türbin Montajı ve Devreye Alınması	72
5.5. Bakım Bulguları ve Düzeltici Faaliyetler	73
6. FİLTRE DEĞİŞİMİNİN ETKİSİNE VE EKONOMİK ANALİZİNE İLİŞKİN HESAPLAMALAR	95
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	111
KAYNAKLAR	113
EKLER	117
EK-1. Gaz türbini bakımı öncesi ve sonrasında yatak ve şaft vibrasyonu değerleri	118
ÖZGEÇMİŞ	119

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. GT13E2 gaz türbini kesiti parça listesi	24
Çizelge 2.2. Gaz türbini hava giriş ve filtre sistemi parça listesi	26
Çizelge 2.3. GT13E2 gaz türbini IGV sistemi parça listesi	30
Çizelge 2.4. GT13E2 gaz türbini yanma odası parça listesi	32
Çizelge 4.1. Bakım prensipleri arasındaki ilişkiler	51
Çizelge 5.1. İşletme kayıt cihazı verileri.....	66
Çizelge 6.1. Kaba filtre teknik özellikleri	100
Çizelge 6.2. İnce filtre teknik özellikleri.....	100
Çizelge 6.3. Türbin çıkış gücü değerleri ve basınç kayıp yüzdeleri	102
Çizelge 6.4. Türbin ısı oranı ve basınç kayıp yüzdeleri.....	103
Çizelge 6.5. Basınç farkı artışı değişen değerler.....	104
Çizelge 6.6. $\Delta p = 15$ mbar, 10 000 OH filtre değişim periyodu	108
Çizelge 6.7. $\Delta p = 12$ mbar, 8700 OH filtre değişim periyodu	108
Çizelge 6.8. $\Delta p = 9$ mbar, 7000 OH filtre değişim periyodu	109
Çizelge 6.9. $\Delta p = 6$ mbar, 4900 OH filtre değişim periyodu	109
Çizelge 6.10. $\Delta p = 5$ mbar, 2500 OH filtre değişim periyodu	110

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. İskenderiyeli Heron tarafından geliştirilen Aeolipile (Hero motoru)	4
Şekil 2.2. Leonardo Da Vinci (MS 1500) tarafından tasarlanan duman değirmeni	4
Şekil 2.3. Giovanni Branca'nın itki türbini.....	5
Şekil 2.4. Newton'un buharlı arabası.....	5
Şekil 2.5. John Barber'ın (1791) pistonlu kompresör, yakıcı ve türbin kullanan gaz türbini çevrimi patent çizimi	6
Şekil 2.6. Whittle türbini şematik diyagramı	7
Şekil 2.7. Basit çevrimli bir gaz türbini	10
Şekil 2.8. İdeal Brayton çevrimleri	11
Şekil 2.9. Gerçek Brayton çevrimi.....	11
Şekil 2.10. Rejeneratif çevrim şematik diyagramı.....	14
Şekil 2.11. Rejeneratif çevrim T-s diyagramı.....	14
Şekil 2.12. Ara soğutmalı gaz türbin santrali şematik gösterimi	15
Şekil 2.13. Ara soğutmalı çevrim T-s diyagramı.....	16
Şekil 2.14. Ara ısıtmalı gaz türbin santrali şematik gösterimi	17
Şekil 2.15. Ara ısıtmalı çevrim T-s diyagramı.....	17
Şekil 2.16. Ara soğutma, ara ısıtma ve rejeneratif çevrim şematik gösterimi	18
Şekil 2.17. Ara soğutma, ara ısıtma ve rejeneratif çevrim T-s diyagramı	18
Şekil 2.18. Buhar enjeksiyonlu çevrim şematik gösterimi	19
Şekil 2.19. Basit çevrim bir gaz türbinine %5 buhar enjeksiyonunun etkisi	20
Şekil 2.20. Evaporatif rejeneratif çevrim şematik gösterimi	21
Şekil 2.21. Brayton-Rankine kombine çevrim şematik gösterimi	22
Şekil 2.22. Kombine çevrim santrali enerji dağılımı akış diyagramı	23

Şekil	Sayfa
Şekil 2.23. GT13E2 gaz türbini kesit gösterimi.....	24
Şekil 2.24. GT13E2 gaz türbini hava giriş ve filtre sistemi.....	26
Şekil 2.25. GT13E2 gaz türbini IGV sistemi.....	29
Şekil 2.26. GT13E2 gaz türbini yanma odası kesit gösterimi.....	32
Şekil 3.1. Gaz türbini eşdeğer işletme saatine göre performans degradasyonu.....	36
Şekil 3.2. Kirlenmenin ısı katsayısı, basınç oranı ve güç çıkışına etkisi	37
Şekil 3.3. Kirlenmeye bağlı performans düşüşü	38
Şekil 3.4. SV20 yüzey kaplamasının oksidasyon grafiği.....	43
Şekil 4.1. Arızalara karşı tedbirler	52
Şekil 4.2. Emre amadelik-verimlilik karşılaştırma grafiği.....	55
Şekil 4.3. Gaz türbini bileşenlerinin duruş süresine katkıları	55
Şekil 4.4. Bir gaz türbini ünitesindeki bakım kapsamaları.....	57
Şekil 6.1. Açık çevrim bir gaz türbini şematik gösterimi	95
Şekil 6.2. Gaz türbini hava giriş filtre sistemi şematik gösterimi.....	98
Şekil 6.3. Gaz türbini hava giriş filtre sistemi tasarımı.....	99
Şekil 6.4. Türbin çıkış gücünün filtrelerin yol açtığı basınç farkı ile değişimi	102
Şekil 6.5. Isı oranının filtrelerin yol açtığı basınç farkı ile değişimi	103
Şekil 6.6. Türbin giriş havasının filtrelerin yol açtığı basınç farkı ile değişimi	104
Şekil 6.7. Yakıt tüketiminin filtrelerin yol açtığı basınç farkı ile değişimi	105
Şekil 6.8. Türbin genel veriminin filtrelerin yol açtığı basınç farkı ile değişimi.....	105
Şekil 6.9. Türbin değerlerinin filtrelerin yol açtığı basınç farkı ile değişimi	106
Şekil 6.10. Türbin işletme saatine göre basınç farkı değerlerinin değişimi.....	107

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Whittle türbini	7
Resim 2.2. GT13E2 gaz türbini kompresör rotoru	28
Resim 2.3. GT13E2 gaz türbini kompresör statoru sabit kanatçıklar	28
Resim 2.4. GT13E2 gaz türbini dairesel yanma odası	31
Resim 2.5. GT13E2 gaz türbini EV yakıcısı.....	33
Resim 3.1. Kompresör kanadı ucundaki çukurcuk korozyonu ve kanada verdiği hasar	45
Resim 5.1. Alstom (GE) GT13E2 gaz türbini.....	65
Resim 5.2. Hava giriş kanatları.....	73
Resim 5.3. Filtre giriş ızgarası	74
Resim 5.4. Hava kanalları	74
Resim 5.5. Hava giriş üst muhafazası kauçuk sızdırmazlık contası	75
Resim 5.6. Ayarlanabilir giriş kılavuz kanatları (VIGV).....	75
Resim 5.7. VIGV kanatlarının eski ve yeni hali	76
Resim 5.8. VIGV kanatlarının ayar kolları	77
Resim 5.9. Kompresör sabit kanat taşıyıcısı (CVC).....	77
Resim 5.10. Kompresör sabit kanatları (1-4. sıra).....	78
Resim 5.11. Kompresör sabit kanatları (5-12. sıra).....	79
Resim 5.12. Kompresör difüzör gövdesi (CDC)	80
Resim 5.13. Yanma odası üst ve alt muhafazaları.....	81
Resim 5.14. Yanma odası iç segment taşıyıcısı.....	82
Resim 5.15. Yanma odası bölmeleri.....	83
Resim 5.16. Türbin çevresel yakıcıları	84
Resim 5.17. Türbin çevresel yakıcı lansları.....	85

Resim	Sayfa
Resim 5.18. Türbin kanat taşıyıcısı	86
Resim 5.19. Türbin 1. 2. 3. kademe sabit kanatları	87
Resim 5.20. Türbin 4. ve 5. kademe sabit kanatları	88
Resim 5.21. Türbin stator ısı tuğlası segmentleri	89
Resim 5.22. Türbin çıkış egzoz muhafazası	90
Resim 5.23. Türbin çıkış kompensatörü.....	91
Resim 5.24. Kompresör hareketli kanat (blade) yüzeyi	92
Resim 5.25. Türbin radyal yatağı.....	93
Resim 5.26. Türbin 1. kademe hareketli kanatlar (blade)	94

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
°	Derece
a₁	Başlatma faktörü
a₂	Hızlı yükleme faktörü
b_i	İşletim faktörü
C	Santigrat
c_p	Sabit basınçtaki özgül ısı
c_v	Sabit hacimdeki özgül ısı
c_{vg}	Gazın sabit hacim özgül ısısı
c_{vh}	Havanın sabit hacim özgül ısısı
F	Fahrenheit
f_i	Yakıt faktörü
h	Entalpi
h	Saat
HP	Beygir gücü
K	Kelvin
k_g	Gazın özgül ısı oranı
kg	Kilogram
k_h	Havanın özgül ısı oranı
kJ	Kilojoule
kPa	Kilopascal
kW	Kilovat
lb	Pound, libre
lbf	Pound-kuvvet
m	Metre
m²	Metrekare
m³	Metreküp

Simgeler**Açıklamalar**

mbar	Milibar
\dot{m}_g	Gaz debisi
\dot{m}_h	Hava debisi
mm	Milimetre
MW	Megavat
MWh	Megavat saat
\dot{m}_y	Yakıt debisi
n	Hızlı sıcaklık değişikliği sayısı
N	Newton
n₂	Hızlı yüklemelerin sayısı
n_{OH}	İşletme sırasındaki veri noktalarının sayısı
P	Basınç
Pa	Pascal
P_{rc}	Kompresör basınç oranı
P_{rt}	Türbin basınç oranı
psia	Mutlak basınç
R_g	Gazın ideal gaz sabiti
R_h	Havanın ideal gaz sabiti
r_p	Türbin basınç oranı
s	Saniye
s	Entropi
T	Sıcaklık
t_{EOH}	Eşdeğer işletme saati
T_f	Yanma sıcaklığı
t_i	Hızlı sıcaklık değişiklikleri için eşdeğer işletme saati
T_{ort}	Ortam sıcaklığı
V	Hacim
W	İş
\dot{W}_{cev}	Çevrim işi
w_i	Su faktörü
\dot{W}_K	Kompresör gücü

Simgeler**Açıklamalar**

\dot{W}_{net}	Net güç
\dot{W}_T	Türbin gücü
\dot{W}_{YO}	Yanma odasına verilen ısı güç (Q_{giren})
γ	Spesifik özgül ısı oranı
Δt_i	İki veri noktası arasındaki süre
ϵ_C	Çıkıştaki basınç kayıp parametresi
ϵ_{YO}	Yanma odası basınç kayıp parametresi
η_{cis}	Kompresör izentropik verimi
$\eta_{\text{çev}}$	Çevrim verimi
η_G	Termik verim
η_{ideal}	İdeal çevrim verimi
η_K	Kompresör verimi
η_T	Türbin verimi
η_{tis}	Türbin izentropik verimi
η_Y	Yanma verimi
μm	Mikrometre

Kısaltmalar**Açıklamalar**

Δp	Basınç farkı (düşüşü)
a	Hava
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AF	Emre amadelik faktörü
AH	Kullanılabilir saatler
B	Brayton çevrimi
BOTAŞ	Boru Hatları ile Petrol Taşıma Anonim Şirketi
C	Kompresör
C	Yanma
CDC	Kompresör difüzör gövdesi
COH	Düzeltilmiş işletme saati
CVC	Kompresör sabit kanat taşıyıcısı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

Dr	Doktor
ECI	Eddy akımı muayenesi
EOH	Eşdeğer işletme saati
ePMI	Verimli partikül madde endeksi
EÜAŞ	Elektrik Üretim Anonim Şirketi
EV	Çevresel girdap yakıcı
FH	Faktörlü saat
FOF	Zorunlu kesinti faktörü
FOH	Zorunlu kesinti saatleri
FPI	Florişıl penetrant muayenesi
FS	Faktörlü başlatma
GE	General Electric
HIP	Sıcak izostatik işleme
HR	Türbin ısı oranı
IGV	Ayarlanabilir giriş kılavuz kanatları
KDV	Katma değer vergisi
LCC	Yaşam döngüsü maliyeti
LHV	Yakıtın alt ısı değeri
Max	Maksimum
MHI	Mitsubishi Heavy Industries
Min	Minimum
MÖ	Milattan önce
MS	Milattan sonra
NDT	Tahribatsız muayene
NO_x	Azot oksit türevleri
OEM	Orijinal ekipman üreticisi
OH	İşletme saati
ÖTV	Özel tüketim vergisi
PH	Toplam dönem saatleri
POH	Planlı kesinti saatleri
ppm	Milyonda bir birim madde

Kısaltmalar**Açıklamalar**

PTPM	Performansa dayalı toplam üretken bakım
RF	Güvenilirlik faktörü
s	Buhar
S	Başlatmaya dayalı azami bakım aralığı
S	Devreye alma adeti
SR	Başlatma güvenilirliği
T	Devreden çıkma (trip) adeti
T	Türbin
TBC	Thermal Barrier Coating (ısı koruma kaplaması)
TL	Türk Lirası
TMF	Termal mekanik yorulma
TPM	Toplam üretken bakım
UH	Kullanım dışı saatler
VIGV	Ayarlanabilir giriş kılavuz kanatları
VLa	Kompresör hareketli kademe

1. GİRİŞ

Gaz türbinlerinin elektrik üretiminde ve kojenerasyon sistemlerinde kullanımı oldukça yaygındır. Günümüzde enerji talebinin gelişen ekonomi ve sanayi ile birlikte gün geçtikçe artması enerji arz güvenliğinin önemini de büyük oranda artırmaktadır. Enerji arz güvenliğini sağlamak amacıyla, elektrik üreten tesislerde sürekli ve belirli performans değerlerinde kesintisiz ve kaliteli bir enerji sağlamak için kullanılan gaz türbinlerinin periyodik bakımlarının zamanında yapılması önem arz etmektedir. Bu periyodik bakımların önceden belirlenmiş bir eşdeğer işletme saatinde yapılması gerekmektedir. Yapılan periyodik bakımlar sonucunda gaz türbinlerinin sürdürülebilir çalışma koşulları ve istenilen performans değerlerinde kesintisiz enerji üretimlerinin sağlanması büyük oranda güvence altına alınmaktadır.

Gaz türbini teknolojisinin enerji sektöründe özellikle son 40-50 yıl içerisinde büyük bir gelişme gösterdiği günümüzde kullanılan türbinlerin verimlerinden de anlaşılmaktadır. Enerji sektöründe kullanılan gaz türbin modelleri ele alındığında geçmişten bugüne kadar gaz türbini verimleri %15 seviyelerinden %45 seviyelerine çıkmakla birlikte, kombine çevrim santrallerinde toplam çevrim verimliliklerinde %65 seviyelerine ulaşıldığı gözlemlenmektedir.

Gaz türbinlerinin gelişmesi ve verimliliklerinin artması çevresel etkiler yönünden de fayda sağlamaktadır. Verimlilik artışı en temel mantığıyla değerlendirildiğinde daha az yakıt ve daha düşük maliyetle daha fazla enerji elde etmek anlamına gelmektedir. Bunun yanında, yakıt tüketiminin azalması, daha az miktarda emisyonların çevreye bırakılarak sera gazı etkilerinin azalmasına ve bu sayede çevreye zarar veren olumsuz etkilerin de azalmasına katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada, öncelikle gaz türbinlerinin tarihsel gelişimleri, temel çalışma prensibi, uygulamada kullanılan çevrimler ve gaz türbini bileşenleri hakkında temel bir bilgilendirme yapılmıştır. Buna ek olarak, gaz türbinlerinde çeşitli nedenlerle ortaya çıkan degradasyon (bozulma) faktörleri, degradasyon faktörlerinin gaz türbini bileşenlerine etkileri, bu etkileri en aza indirebilmek için özellikle kompresörde ve diğer bileşenlerde uygulanan işlemler incelenmiştir. Gaz türbinlerini genel bir sistem olarak ele aldığımızda gaz türbinlerinin tasarımında ortaya konulan ve testlerle doğrulanan performans ve verim değerlerinin zaman

içerisinde değişimleri ve bu değişimlerin hangi seviyede geri döndürülebildiği veya döndürülemediği değerlendirilmiştir. Degradasyon faktörlerinin etkilerini en aza indirilebilmek için yapılan periyodik bakımların neler olduğu, bakım yöntemleri, bakımların uygulanmasında kullanılan aralıkların belirlenmesi, bakım kapsamalarında hangi işlemlerin yapıldığı ve Türkiye’de kurulu bulunan bir gaz türbinli kombine çevrim santralinde yapılan bakım işlemlerinde elde edilen bulgular ve karşılaşılan degradasyon faktörleri ele alınmıştır. Ayrıca gaz türbinlerinin çalışma ömürlerine, çıkış gücü, verim, türbin ısı oranı, yakıt tüketimi ve degradasyona neden olabilecek türbin giriş havasında zaman içerisinde filtrelerde meydana gelen kirlilikler sonucunda oluşan basınç düşüşünün etkileri değerlendirilerek, elde edilen sonuçlarla filtre değişiminin zaman ve maliyet yönünden incelemesi yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye’de kurulu bulunan gaz türbinli santrallerin işletilmesi ve bakımını yapan sektör paydaşlarına gaz türbinleri hakkında temel bilgi aktarımı sunarak ülkemizin enerji üretiminde önemli bir yere sahip olan bu santrallerin sürekli ve sürdürülebilir bir şekilde istenilen performans ve verim değerlerinde çalıştırılmasına katkı sağlamaktır. Bu nedenle, özellikle bu santrallerde zaman içerisinde meydana gelebilecek degradasyon faktörleri ve etkileri detaylı incelenerek gaz türbinlerinin ömürlerine doğrudan etki eden türbin giriş hava kalitesini sağlayan filtrelerdeki basınç düşüşü ve bunun sonucunda yapılması gereken bakım ve yenileme işlemlerine yol göstermesi açısından bir katkı sağlaması hedeflenmektedir. Bu çalışmada yöntem olarak sahadan alınan verilerle yapılan hesaplamalar ve incelemeler, sektördeki literatür bilgileriyle karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, gaz türbini periyodik bakımlarının önemi, etkileri ve içeriklerinin belirlenmesinde ele alınacak faktörler ortaya konulmuştur.

2. GAZ TÜRİNLERİ

2.1. Genel

Gaz türbinleri turbo makineler arasında birçok farklı kullanım alanına sahiptir. Enerji üretimi, petrol ve gaz, havacılık, proses tesisleri vb. kritik öneme sahip alanlarda kullanılmaktadırlar. Günümüzde doğal gaz, dizel yakıt, nafta, metan, ham petrol, düşük ısı değerli gazlar, buharlaşmış akaryakıt ve biyokütle gazlarıyla çalışan gaz türbinleri bulunmaktadır. Gaz türbinlerinin gelişimine malzeme teknolojisi, yeni kaplama yöntemleri, soğutma sistemleri ve kombine çevrimler büyük katkı sağlamışlardır. Sıkıştırma oranlarının 7:1'den 45:1'e kadar yükselmesiyle birlikte basit çevrimli gaz türbini ısı verimliliği yaklaşık %15'ten %45'e kadar çıkmıştır. Gaz çevriminin atık ısısının kullanılarak buhar çevrimi üzerinden elektrik elde edilen kombine çevrim santrallerinde %55 verim değerleri elde edilebilmektedir. Son yıllarda gaz türbini teknolojisindeki tasarım iyileştirmeleriyle birlikte kombine çevrim verimlilikleri %65'lere kadar çıkmaktadır. Genel bir kural olarak verimlilikteki %1'lik bir artış, yaklaşık olarak %3,3 daha fazla sermaye yatırımı yapılabileceği anlamına gelmektedir [1]. Ancak, verimlilikteki artışın emre amadelikte bir düşüşe yol açmamasına dikkat edilmelidir.

Bir buhar santralının kurulumundan üretime kadar geçen süre yaklaşık 42 ile 60 ay arasında iken, kombine çevrim gaz türbin santralleri için bu süre yaklaşık 22 ile 36 ay arasındadır. Kombine çevrim gaz türbin santrallerinde inşaat süresi yaklaşık 18 ay iken, çevre izinlerinin alınması çoğu durumda 12 ay, mühendislik ise 6 ile 12 ay arası sürmektedir. Santralin faaliyete geçmesi için geçen süre santralin ekonomisini etkilemektedir. Yatırılan sermaye ne kadar uzun süre geri dönüş olmadan kullanılırsa o kadar fazla faiz, sigorta ve vergi maliyetleri ortaya çıkmaktadır [1].

2.2. Gaz Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi

Antik çağlardan günümüze kadar güce hakim olmak için birçok keşif ve arayış bulunmaktadır. Tarihsel süreçte insanlığın bilinen başlangıcından MS 1700 yılına kadar tüm hareket gücü insanlar veya hayvanlar tarafından sağlanmıştır. Daha sonra, hidrolik türbinler, buhar türbinleri ve gaz türbinlerini kapsayan ve günümüzde turbo makine mühendisliğinin en son teknolojisini temsil eden modern turbo fan motorla sonuçlanan hızlı bir teknoloji

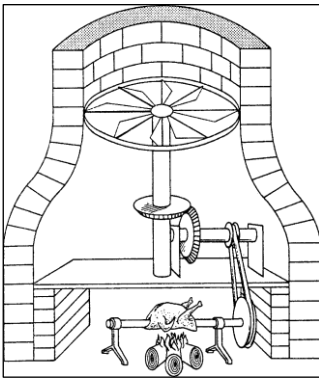
büyümesi olmuştur. Günümüzde pek çok kişi buhar ve gaz türbini bileşenleri arasındaki benzerliklerin farkında olsa da tam olarak herkes tarafından bu iki ürünün paylaştığı ortak tarih takdir edilmemektedir. Fakat tarih bize gaz türbini ve buhar türbini fikrinin eş zamanlı olarak tasarlandığını söyler [2].

Turbo makinelerin en eski gelişmelerinden biri çeşitli kaynaklarda yaşadığı zaman dilimi farklılık gösterse de yaklaşık olarak MÖ 130 yılına kadar dayanan İskenderiyeli Hero'ya atfedilmektedir. Hero, Pnömatik adlı kitabında, Şekil 2.1.'de gösterilen ve reaksiyon prensibini kullanarak dönebilen Aeolipile (Hero motoru) olarak bilinen bir cihaz tanımlamıştır. Bu cihazda kase şeklinde ve içinde su olan bir kazanda ısınan sudan dolayı oluşan buhar, iki tüpten kürenin içine girmekte ve kürede karşılıklı iki jet görevi gören kısımlardan dışarı atılarak kürenin dönmesini sağlamaktaydı [2].

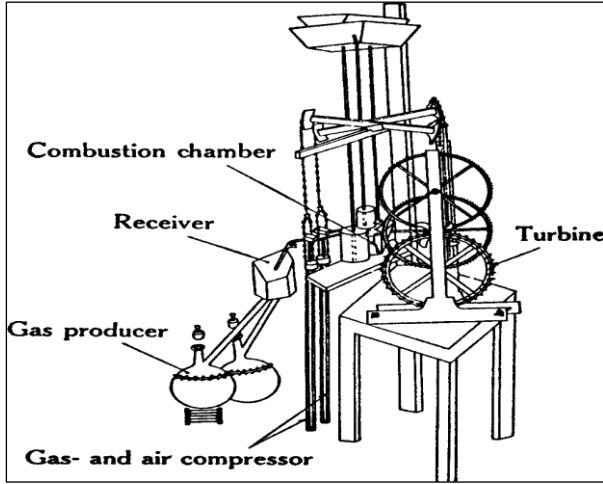


Şekil 2.1. İskenderiyeli Heron tarafından geliştirilen Aeolipile (Hero motoru) [2]

Leonardo Da Vinci, yaklaşık olarak MS 1500 yılında Şekil 2.2.'de gösterilen bir “Duman değirmeni” tarif etmiştir. Bu cihazda sıcak duman, türbin görevi gören fan benzeri kanatların üzerinden geçiyor ve konik dişliler yardımıyla şişı döndürüyordu [2].



Şekil 2.2. Leonardo Da Vinci (MS 1500) tarafından tasarlanan duman değirmeni [2]



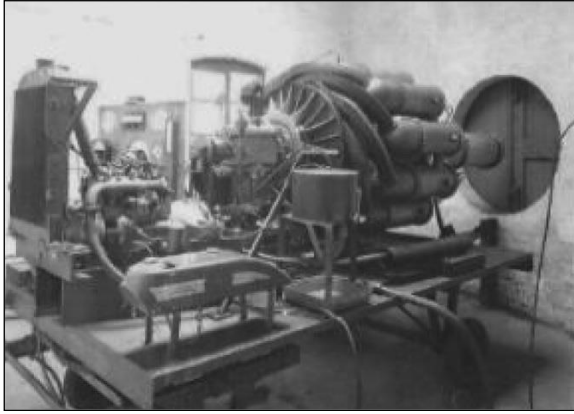
Şekil 2.5. John Barber'ın (1791) pistonlu kompresör, yakıcı ve türbin kullanan gaz türbini çevrimi patent çizimi [2]

1791 yılında İngiltere'de John Barber, modern gaz türbininin termodinamik döngüsünü kullanan bir tasarımın patentini almıştır. Bu tasarım zincir tahrikli pistonlu tipte bir kompresör, bir yakıcı ve türbine sahiptir. Barber, yanıcı gaz üretmek için odun kömürü, gaz veya diğer uygun yakıtların kullanılmasını önermiştir. Üretilen ve sisteme giren gaz ortak bir alıcıya ve ardından kompresör havasıyla karışıp ateşlendiği yanma odasına girmektedir. Ortaya çıkan sıcak gazların türbin çarkına çarpması sağlanmaktadır. Türbin parçalarının aşırı ısınmasını önlemek için gazı su enjeksiyonu yoluyla soğutacak mekanizma eklenmiştir. Bu makinenin üretildiğine dair herhangi bir kayıt yoktur. Ayrıca pistonlu kompresörün büyük güç gereksinimleri nedeniyle kendi kendini idame ettirmesi pek mümkün gözükmemektedir. Barber'ın cihazının patent çizimi Şekil 2.5.'te gösterilmektedir [2].

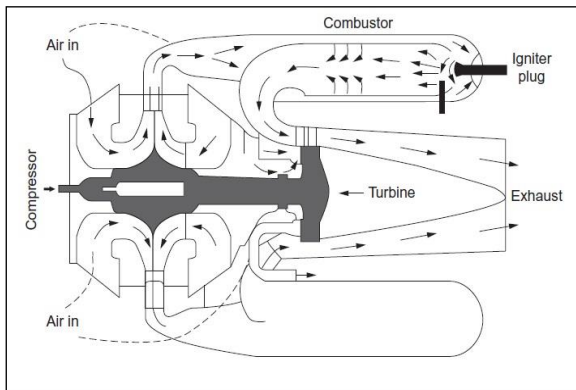
1808'de John Dumball çok kademeli bir türbin tasarlamıştır fakat onun fikri yalnızca hareketli kanatları içermektedir. Gaz akışını sonraki aşamalara yönlendirecek sabit kanatlar tasarımında bulunmamaktadır. Her dönen kademe arasında sabit bir kademeye ihtiyaç duyulduğunu fark etmiş olsaydı aksel akışlı türbin konseptini ortaya çıkararak tarihe geçecekti. 1850 yılında İngiltere'de Fernimough, havanın bir kömür ızgarasından geçirildiği ve suyun sıcak gaza püskürtüldüğü hibrit bir buhar ve gaz türbini önermiştir. Gaz ve buhar karışımı daha sonra iki kanatlı bir rotoru döndürmektedir. 1872 yılına kadar Dr. Franz Stolze, Barber ve Dumball'un fikirlerini birleştirerek aksel akışlı bir türbinle çalıştırılan ilk aksel akışlı kompresörü geliştirmiştir. Kaynak yetersizliği nedeniyle makinesini 1900 yılına kadar üretememiştir. Stolze'nin tasarımı çok kademeli aksel akışlı bir kompresör, tek bir yanma odası, çok kademeli bir aksel türbin ve kompresör çıkış havasını ısıtmak

için egzoz gazlarını kullanan bir rejeneratörden oluşuyordu. Bu ünite 1900 ve 1904 yılları arasında test edilmiş ancak hiçbir zaman başarılı bir şekilde çalışmamıştır [2].

Birçok kişi Frank Whittle'ı günümüzün modern gaz türbininin babası olarak kabul etmektedir. Whittle türbini Ocak 1930'da üretilmiştir ve yaklaşık olarak 4450 N itme gücüne ve %14 verimliliğe sahiptir. Whittle'ın tasarımında hava santrifüjlü bir kompresörde sıkıştırılmakta ve daha sonra radyal girişli bir türbin aracılığıyla genişletilmektedir. Resim 2.1.'de Whittle türbini'nin bir fotoğrafı ve Şekil 2.6.'da şematik diyagramı gösterilmektedir. 1903 yılında General Electric bir turboşarj motoru geliştirmiş ve 1941 yılında Amerika'nın ilk uçak motoru için Whittle türbinini modifiye etmiştir. 1945 yılında Westinghouse, yalnızca ABD tasarımına dayanan ilk gaz türbinini geliştirmiştir. Gaz türbini aksenal akışlı bir kompresör, bir türbin ve dairesel bir yakıcı içermektedir [2].



Resim 2.1. Whittle türbini [2]



Şekil 2.6. Whittle türbini şematik diyagramı [2]

Günümüzde ise gaz türbinlerinin birçok farklı verimlilik artırıcı uygulamaları ve malzeme teknolojilerindeki gelişmelerin de katkısıyla üretici ve geliştirici konumunda bulunan çok uluslu şirketler tarafından temin ve tesis edildiği gözlemlenmektedir. Bu firmalardan bazılarını sektördeki satış ve kurulu tesislere göre verecek olursak; GE, Siemens, MHI (Mitsubishi Heavy Industries), Ansaldo, Solar Turbines, Rolls-Royce, United Tech vb. birçok firma bulunmaktadır.

2.3. Gaz Türbinlerinin Sınıflandırılması

Gaz türbinlerini birçok farklı açıdan sınıflandırmak mümkündür. Aşağıda önem arz eden durumlarına göre farklı sınıflandırmalar yapılmıştır.

1. Çalışma maddesinin izlediği yola göre [3]:

- Kapalı çevrim gaz türbinleri
- Açık çevrim gaz türbinleri
- Yarı kapalı çevrim gaz türbinleri

2. Isı soğurma sürecine göre [3]:

- Sabit basınçlı gaz türbinleri
- Sabit hacimli gaz türbinleri

3. Kullanım alanları ve güçlerine göre [1]:

Dış karkaslı ağır hizmet gaz türbinleri

Bu türbinler basit çevrim konfigürasyonunda 3 ila 480 MW arasında değişen büyük güç üretim üniteleridir ve verimlilikleri %30 ila %48 arasında değişmektedir.

Uçak türevi (aeroderivatif) gaz türbinleri

Aeroderivatifler, adından da anlaşılacağı gibi, uçakların ana taşıyıcısı olarak havacılık endüstrisinde ortaya çıkan güç üretim üniteleridir. Baypas fanları çıkarılarak ve egzozlarına bir güç türbini eklenerek elektrik üretim endüstrisine de uyarlanmıştır. Güçleri yaklaşık 2,5 ila 50 MW arasında değişmektedir. Bu ünitelerin verimlilikleri %35 ila %45 arasında değişmektedir.

Endüstriyel tip gaz türbinleri

Bu türbinler yaklaşık 2,5 ila 15 MW arasında değişmektedir. Bunlar birçok petrokimya tesisinde kompresör tahrik sistemleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ünitelerin verimlilikleri düşük ve yaklaşık %30'lardadır.

Küçük gaz türbinleri

Bu gaz türbinleri yaklaşık 0,5 ila 2,5 MW aralığındadır. Genellikle santrifüj kompresörlere ve radyal akışlı türbinlere sahiptirler. Basit çevrim uygulamalarının verimlilikleri %15 ila %25 arasında değişmektedir.

Mikro türbinler

Bu türbinler 20 ila 350 kW aralığındadır. Bu türbinlerin büyümesi, bölgesel elektrik üretim pazarında bir artış olduğu için 1990'ların sonlarından itibaren hızlı olmuştur.

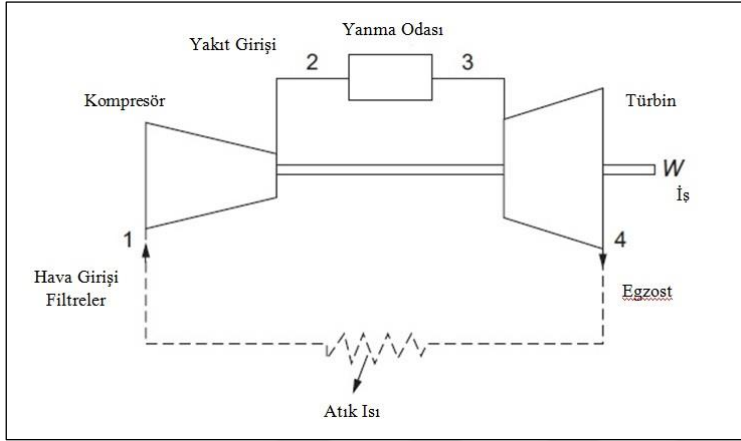
Araç gaz türbinleri

Bu türbinler 300 ila 1.500 HP arasında değişmektedir. İlk araç türbini 1954 yılında Chrysler Corporation tarafından üretilmiş ve bunu Ford Motor Company'nin kamyon motoru izlemiştir. Çok başarılı olan tek araç türbini ABD ordusu Abrams tankında kullanılan gaz türbini olmuştur.

2.4. Gaz Türbinlerinin Temel Çalışma Prensibi ve Çevrimler

Basit çevrimli bir gaz türbini santrali; hava giriş sistemi, hava filtreleri, kompresör, yanma odası, gaz türbini, generatör ve egzoz kısımlarından oluşur. Şekil 2.7'de gösterilen basit açık çevrim, gaz türbinlerinin temel çalışma mantığına; yani sıkıştırılan hava ile bu havaya püskürtülen yakıtın yanmasına dayanır. Gaz türbinlerinin çalışması için öncelikle sisteme hava girişinin olması gerekmektedir. Hava giriş sistemi olarak adlandırılan ve çeşitli filtrelerden oluşan bu bölümden çevre havası geçerek içerisindeki partiküllerden ve kirliliklerden mümkün olduğunca arındırılmış bir şekilde kompresöre gönderilir. Kompresörde havanın belirli bir basınç oranı ile sıkıştırılması sonucu sıcaklığı ve basıncı artar. Sıcaklığı ve basıncı artan hava başka bir deyişle yakma havası olarak adlandırılır. Yanma odasına gönderilen yakma havasına türbinde kullanılan motorin, doğalgaz vb. yakıt püskürtülerek yakıcılarla ateşleme yapılır ve yanma reaksiyonunun gerçekleşmesi sağlanır. Ardından yanma sonucu ortaya çıkan yüksek enerjili yakıt-hava karışım gazı türbine

gönderilir ve türbin sabit ve hareketli kanatlarından geçerek türbin şaftını döndürür ve bu sayede mekanik enerji elde edilir. Bu mekanik enerji türbin şaftı ve kaplin bağlantılarıyla generatöre iletilerek generatörde elektrik enerjisine dönüştürülür. Türbinden geçen yakıt-hava karışımının tamamen soğurulamayan enerjisi ise atık ısı olarak egzoz kısmından dışarıya atılır. Atık ısının da kombine çevrim, kojenerasyon, bölgesel ısıtma vb. uygulamalarla tekrar kullanılması sistem verimliliği için oldukça önemlidir.

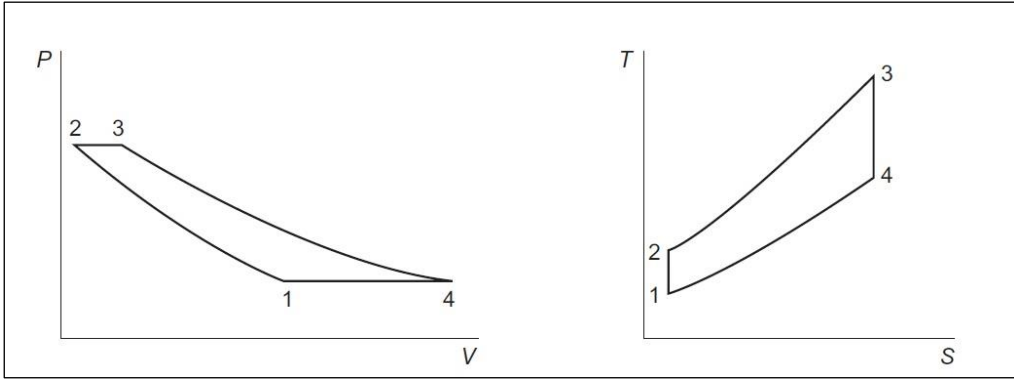


Şekil 2.7. Basit çevrimli bir gaz türbini [1]

2.4.1. Brayton çevrimi

Gaz türbinlerinin çalışma sistematığının temelinde “Brayton çevrimi” yatmaktadır. Brayton çevrimi ismini Amerikalı mühendis George Brayton’dan almıştır. George Brayton 1872 yılında patentini aldığı iki zamanlı ve kerosen yakan pistonlu motoru tasarlarken bu çevrimi keşfetmiştir.

İdeal formunda Brayton çevrimi iki izobarik (sabit basınç) süreçten ve iki izentropik (sabit entropi) süreçten oluşur. İki izobarik süreç, gaz türbininin yanma sistemi ve ısı geri kazanımlı buhar jeneratörü sistemlerinin gaz tarafından oluşur. Aynı zamanda adyabatik olan iki izentropik süreç (çalışma akışkanına veya çalışma akışkanından ısının aktarılmadığı termodinamik süreç), gaz türbinindeki sıkıştırma (kompresör) ve genişleme (türbin) süreçlerini temsil eder. Şekil 2.8’de ideal Brayton çevrimleri gösterilmektedir.

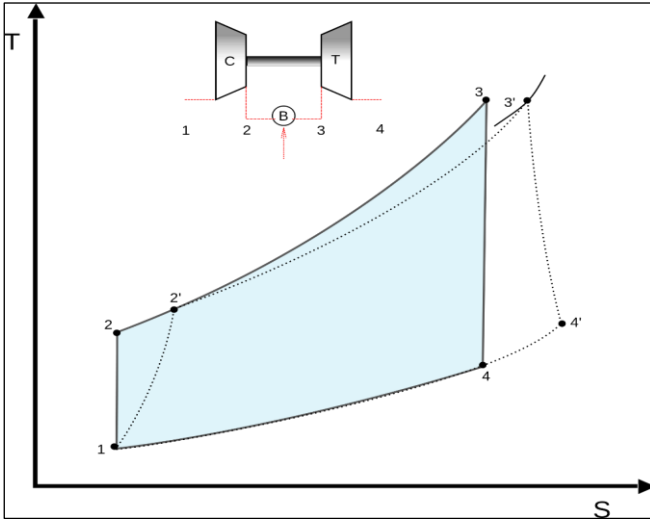


Şekil 2.8. İdeal Brayton çevrimleri [1]

İdeal Brayton çevrimi aşağıdaki dört süreçten oluşur [4];

1. İzentropik sıkıştırma 1-2
2. Tersine çevrilebilir izobarik ısıtma 2-3
3. İzentropik genişleme 3-4
4. Tersine çevrilebilir izobarik soğutma 4-1

Şekil 2.9.'da gösterilen gerçek açık çevrim, kompresör ve türbinin verimi ve yakıcı boyunca basınçtaki kaybı dikkate aldığımızda ortaya çıkan çevrimdir.



Şekil 2.9. Gerçek Brayton çevrimi [4]

Termodinamiğin birinci yasasının Şekil 2.8'de havanın Brayton çevrimine göre basitleştirilmiş bir uygulaması (kinetik ve potansiyel enerjilerde hiçbir değişiklik olmadığı varsayılarak) aşağıdaki ilişkilere sahiptir.

Kompresör gücü;

$$\dot{W}_K = \dot{m}_h(h_2 - h_1) \quad (2.1)$$

Türbin gücü;

$$\dot{W}_T = (\dot{m}_h + \dot{m}_y)(h_3 - h_4) \quad (2.2)$$

Toplam çevrim gücü;

$$\dot{W}_{\text{çev}} = \dot{W}_T - \dot{W}_K \quad (2.3)$$

Sisteme ısı girişi olduğunda;

$$\dot{Q}_{2,3} = \dot{m}_y LHV_y = (\dot{m}_h + \dot{m}_y)(h_3) - \dot{m}_h h_2 \quad (2.4)$$

Böylece, adyabatik ısı verimliliği:

$$\eta_{\text{çevrim}} = \frac{\dot{W}_{\text{çevrim}}}{\dot{Q}_{2,3}} \quad (2.5)$$

Basınç oranı ve türbin yanma sıcaklığı artırılırsa Brayton çevriminin ısı verimliliği artar. Genel adyabatik ısı çevrim verimliliğine ilişkin bu ilişki aşağıdaki temel varsayımlara dayanmaktadır:

$$(1) \dot{m}_h \gg \dot{m}_y$$

(2) Gaz kalorifik ve ısı olarak mükemmeldir, yani sabit basınçtaki özgül ısı (c_p) sabit hacimdeki özgül ısı (c_v) sabittir, dolayısıyla spesifik özgül ısı oranı (γ) çevrim boyunca sabit kalır.

(3) Hem kompresör hem de türbindeki basınç oranı (r_p) aynıdır.

(4) Tüm bileşenler %100 verimlilikte çalışır.

Bu varsayımlarla, ideal Brayton çevrimi için basınç oranının bir fonksiyonu olarak ideal adyabatik ısı çevrim verimliliği üzerindeki etki ve ortam sıcaklığı ile yanma sıcaklığı arasındaki ilişki şu şekilde verilir [1]:

$$\eta_{\text{ideal}} = \left(1 - \frac{1}{r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right) \quad (2.6)$$

Basınç oranının hem kompresörde hem de türbinde aynı olduğunu varsayarsak; kompresördeki basınç oranı kullanılarak aşağıdaki bağıntılar geçerlidir:

$$\eta_{ideal} = \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \quad (2.7)$$

Türbindeki basınç oranını kullanırsak;

$$\eta_{ideal} = \left(1 - \frac{T_4}{T_3}\right) \quad (2.8)$$

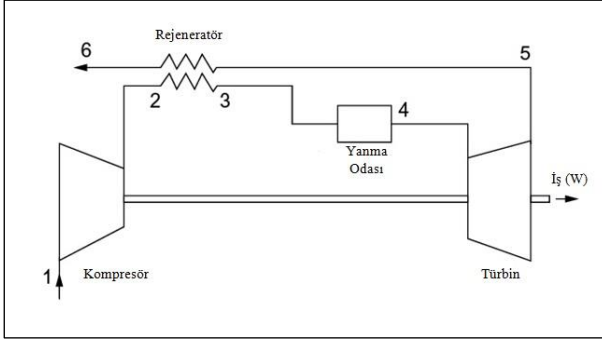
Gerçek çevrim durumunda, yanma sıcaklığı (T_f) ile türbin ortam sıcaklığı (T_{ort}) arasındaki genel adyabatik ısı çevrim verimliliğini elde etmek için kompresörün (η_K) ve türbinin (η_T) verimliliklerinin etkisi de dikkate alınmalıdır. Bu ilişki aşağıdaki denkleme verilmiştir:

$$\eta_{\text{çevrim}} = \left(\frac{\eta_T T_f - \frac{(T_{ort}) r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{\eta_K}}{(T_f) - (T_{ort}) - (T_{ort}) \left(\frac{r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\eta_K} \right)} \right) \left(1 - \frac{1}{r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right) \quad (2.9)$$

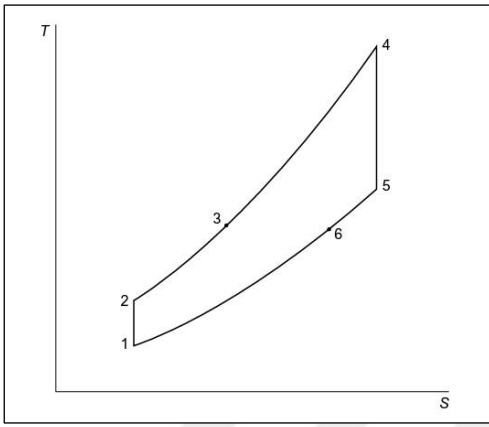
Gaz türbinlerinde çevrim verimliliğini artırmak için kompresörde harcanan işin ve yanma odasına yakıt ile giren ısının azaltılması gerekmektedir. Bunların çeşitli uygulamaları aşağıdaki yöntemlerle gerçekleştirilmektedir [1].

2.4.2. Rejeneratif çevrim

Basit bir gaz türbini çevriminde türbin çıkış sıcaklığı kompresörden çıkan havanın sıcaklığından kayda değer ölçüde yüksektir. Türbinden çıkan sıcak egzoz gazının kompresör ve yanma odası arasındaki havayı önceden ısıttığı bir sistem dizayn edilmiştir [1]. Bu sistem rejeneratör olarak adlandırılmaktadır. Rejeneratör kullanılarak sistemin yakıt gereksinimi azaltılabilmektedir. Dünyada yakıt rezervlerinin kısıtlı olması ve yakıt maliyetlerinin her geçen gün önemi artan bir gider kalemi olması değerlendirildiğinde, rejeneratif çevrimli sistemlerin önemi daha da artmaktadır. Şekil 2.10 rejeneratif çevrimin şematik bir diyagramını ve Şekil 2.11 T-s diyagramındaki performansını göstermektedir.



Şekil 2.10. Rejeneratif çevrim şematik diyagramı [1]



Şekil 2.11. Rejeneratif çevrim T-s diyagramı [1]

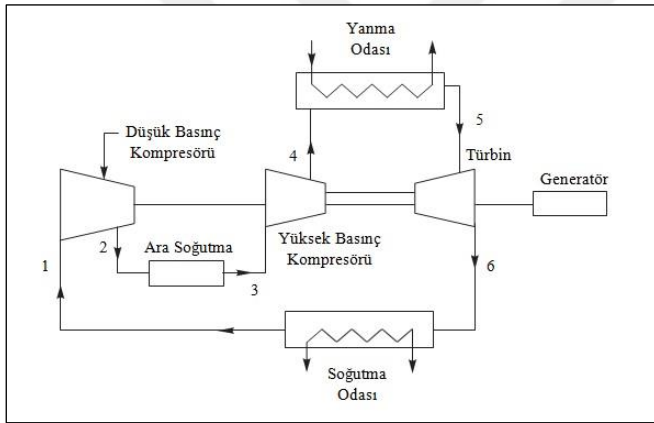
Rejeneratif ve reküperatif olmak üzere iki tür ısı eşanjörü vardır. “Rejeneratif ısı eşanjörü” terimi, iki akış arasındaki ısı transferinin üçüncü bir ortamın dönüşümlü olarak iki akışa maruz kalmasından etkilendiği bir sistem için kullanılır. Isı, döngüsel bir sıcaklığa maruz kalan üçüncü ortamın içine ve dışına art arda akar. Bu tip ısı eşanjörleri çalışma alanlarının dar olduğu yerlerde yaygın olarak kullanılır [1].

Rekuperatif bir ısı eşanjöründe ise ısı transfer yüzeyinin her bir elemanı sabit bir sıcaklığa sahiptir. Bu sayede, gaz güzergahlarını ters akışta ayarlayarak, akış yönündeki matristeki sıcaklık dağılımı oluşturularak ısı transferi koşulları için optimum performans sağlar. Bu optimum sıcaklık dağılımı, karşıt akışlı bir rejeneratörde ideal olarak elde edilebilir ve çapraz akışlı bir rejeneratörde buna çok yaklaşılabilir [1].

2.4.3. Ara soğutmalı çevrim

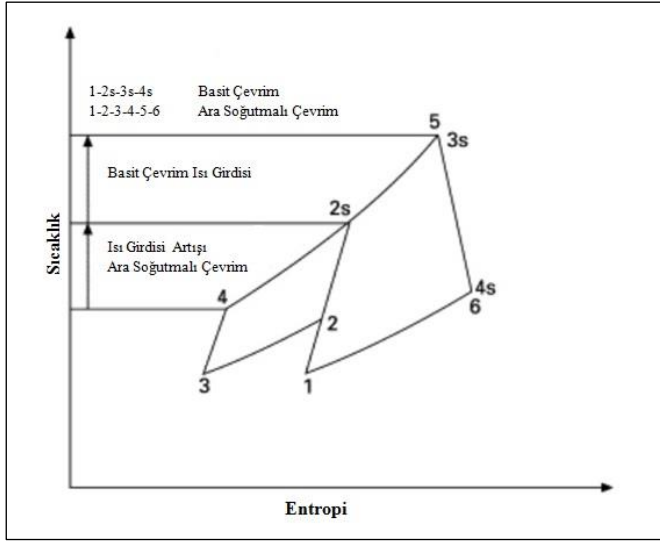
Gaz türbini tarafından üretilen işin büyük bir kısmı kompresör tarafından kullanılmaktadır. Havayı iki aşamada sıkıştırarak ve ikisi arasında bir ara soğutucu kullanarak kompresör işi azaltılabilir. Kompresör işi azaldığında gaz türbininin net çıkış işi artar.

Ara soğutmalı basit çevrim kompresör tarafından tüketilen gücü azaltır. Tüketilen güçteki azalma, ikinci kompresörün veya diğer takip eden kademelerin giriş sıcaklığının ortam havası ile aynı seviyeye soğutulması ve aynı toplam basınç oranının korunması ile gerçekleştirilir. İdeal bir basit çevrimin ısıl verimliliği bir ara soğutucunun eklenmesiyle azalır. Ara soğutmalı kapalı çevrim bir gaz türbini sisteminin şematik düzenlemesi Şekil 2.12’de gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Ara soğutmalı gaz türbin santrali şematik gösterimi [1]

Şekil 2.12’de öncelikle düşük basınçlı kompresörde hava sıkıştırılır. Bu sıkıştırma sonucunda havanın basıncı ve sıcaklığı artar. Sıkıştırılmış havanın sıcaklığını ilk sıcaklığına düşüren, ancak basıncı sabit tutan bir ara soğutucuya geçirilir. Bundan sonra, sıkıştırılmış hava yüksek basınçlı kompresör olarak bilinen ikinci kompresörde bir kez daha sıkıştırılır. Daha sonra basınçlı hava yanma odasından ve ardından türbinden geçirilir. Son olarak, hava soğutma odasında soğutulur ve tekrar düşük basınçlı kompresöre geçirilir [3]. Şekil 2.13’te ara soğutmalı çevrimin sıcaklık ve entropi diyagramı gösterilmektedir.

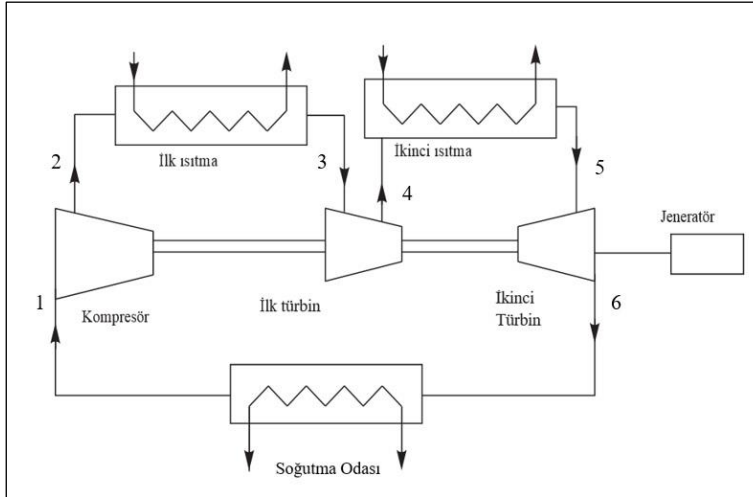


Şekil 2.13. Ara soğutmalı çevrim T-s diyagramı

Bu çevrim, iş çıkışında yaklaşık olarak %30'luk bir artış sağlar, ancak genel adyabatik ısı verimliliğinde bir miktar azalma gerçekleşir. Ara soğutmalı rejeneratif çevrim ise, güç çıkışını ve adyabatik ısı verimliliği artırabilir. Bu kombinasyon verimliliğinde yaklaşık %12'lik bir artış ve güç çıkışında yaklaşık %30'luk bir artış sağlar [1].

2.4.4. Ara ısıtmalı çevrim

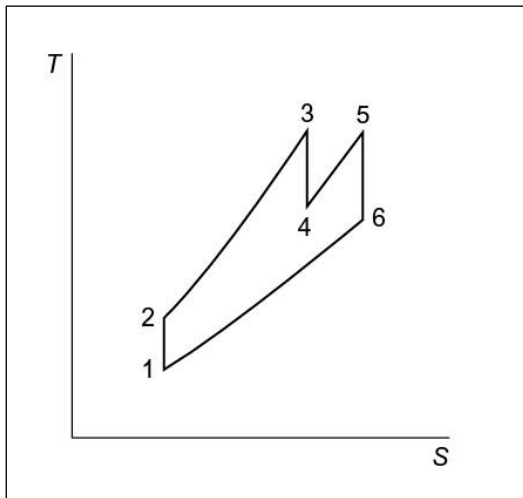
Bir gaz türbininin çıkış gücünü, sıcak havayı iki aşamada genişleterek ve ikisi arasında bir ara ısıtıcı kullanarak önemli ölçüde iyileştirmek mümkündür. Ara ısıtmalı bir kapalı çevrim gaz türbini sisteminin şematik düzenlemesi Şekil 2.14'te gösterilmektedir. Bu düzenlemede hava önce kompresörde sıkıştırılır, ısıtma odasına ve ardından birinci türbine iletilir. Hava bir kez daha başka bir ısıtma odasına ve ardından ikinci türbine iletilir. Son olarak, hava soğutma odasında soğutulur ve tekrar kompresöre iletilir [3].



Şekil 2.14. Ara ısıtmalı gaz türbin santrali şematik gösterimi [3]

Ara ısıtmalı çevrim türbin işini artırır. Çevrimin net işi, kompresör işini veya türbin giriş sıcaklığını değiştirmeden, türbin genişlemesini her genişlemeden önce sabit basınçlı ısıtma ile iki veya daha fazla parçaya bölerek artırılabilir. Ara soğutmayla bağlantılı olarak basit bir çevrimin adyabatik ısıl veriminin ara ısıtmanın eklenmesiyle düştüğü, buna karşın iş çıktısının arttığı görülebilir. Bununla birlikte, rejeneratör ve ara ısıtıcı kombinasyonu adyabatik ısıl verimi artırabilir.

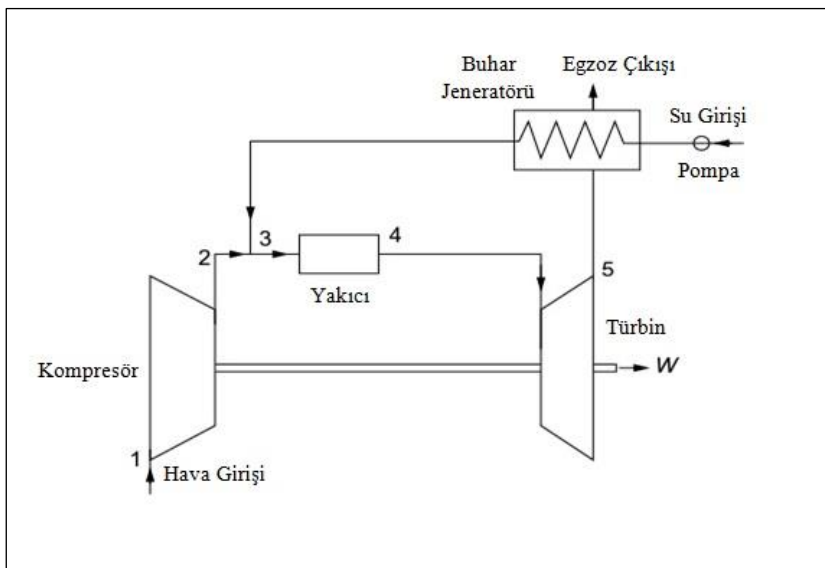
Ara ısıtmalı çevrim, basit çevrimde gerçekleşenden daha düşük bir adyabatik ısıl verime sahip olmasına rağmen yaklaşık %35 daha fazla türbin çıkış gücü üretir. Ara ısıtmalı basit çevrime ait sıcaklık ve entropi diyagramı Şekil 2.15'te verilmiştir [1].



Şekil 2.15 Ara ısıtmalı çevrim T-s diyagramı [1]

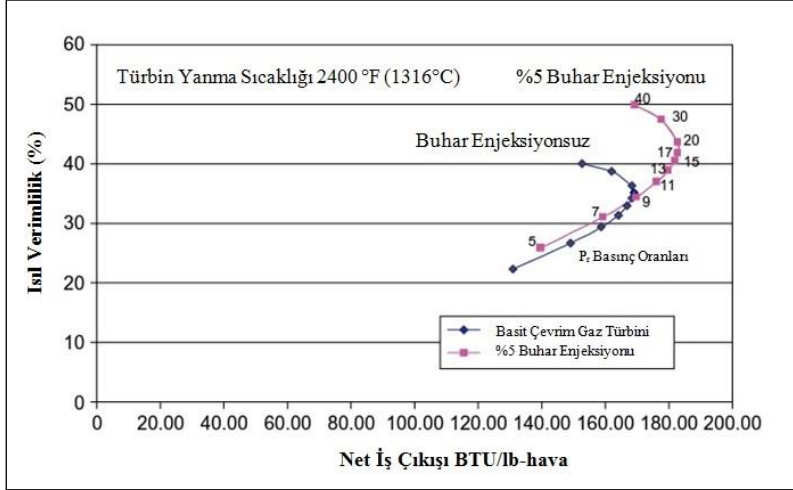
2.4.6. Buhar enjeksiyonlu çevrim

Buhar enjeksiyonu, pistonlu motorlarda ve gaz türbinlerinde uzun yıllardır kullanılmaktadır. Bu çevrim, kirlilik ve daha yüksek adyabatik ısıl verimlilik ile ilgili günümüzdeki kaygılara bir çözüm sunabilmektedir. Korozyon ile ilgili sorunlar böyle bir sistemin önündeki en büyük engeldir. Bu sistemde konsept basit ve anlaşılırdır. Şekil 2.18’de gösterildiği gibi, su kompresör çıkış havasına enjekte edilir ve türbinden geçen kütleli debiyi artırır. Kompresörün çıkış yönüne enjekte edilen buhar, kompresörü çalıştırmak için gereken işi artırmaz [1].



Şekil 2.18. Buhar enjeksiyonlu çevrim şematik gösterimi [1]

Bu proseste kullanılan buhar, türbin egzoz gazı tarafından üretilir. Genellikle 1 bar ve 26,7 °C sıcaklıktaki su pompaya ve rejeneratöre girer ve burada kompresör çıkışının 4 bar üzerine ve kompresörden çıkan hava ile aynı sıcaklığa getirilir. Buhar, kompresörden sonra yakıcıdaki birinci bölge sıcaklığını ve NO_x çıkışını azaltmaya yardımcı olan uygun bir karışım oluşturmak için yakıcının girişinin daha gerisine enjekte edilir [1].



Şekil 2.19. Basit çevrim bir gaz türbinine %5 buhar enjeksiyonunun etkisi [1]

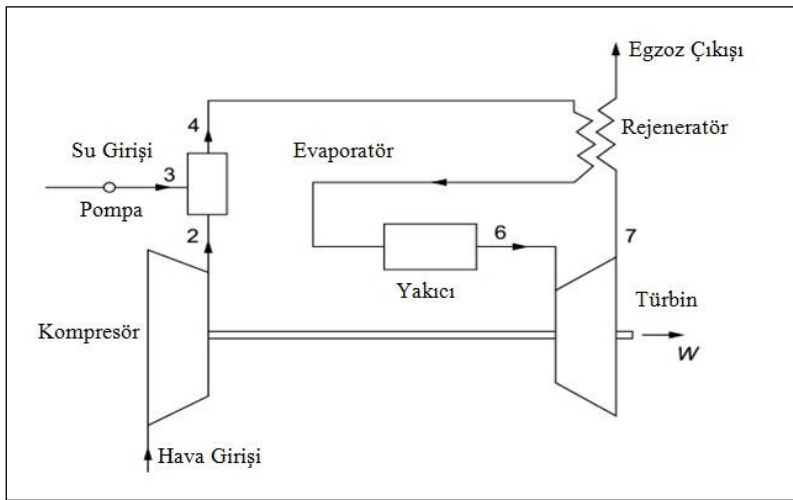
Şekil 2.19, 1316 °C türbin yanma sıcaklığında ağırlıkça %5 buhar enjeksiyonunun sistem üzerindeki etkisini göstermektedir. Buhar enjeksiyonu kompresör çıkış basıncından 4 bar daha yüksek bir basınçta yapılmıştır. 1316 °C sıcaklıkta yaklaşık %5 enjeksiyon ve 17:1 basınç oranıyla, basit çevrime göre adyabatik ısıl verimlilikte yaklaşık %19'luk bir artışla birlikte iş çıkışında %8,3'lük bir artış kaydedilmiştir [1].

Güç artışı için buhar enjeksiyonu uzun yıllardır kullanılmaktadır ve yenilenebilir tesisler için çok iyi bir seçenektir. Bu çevrimin en büyük avantajı düşük NO_x üretim seviyesidir. Bu düşük NO_x seviyesi, buharın kompresör deşarj difüzör duvarına ve yakıcıdan da oldukça geriye enjekte edilmesi ve bölge boyunca homojen bir buhar-hava karışımı oluşturulmasıyla elde edilir. Homojen karışım yakıt-hava karışımının oksijen içeriğini azaltır ve ısı kapasitesini artırır, bu da yanma bölgesinin sıcaklığını ve oluşan NO_x'i azaltır. Saha testleri, ağırlık olarak yakıt akışına eşdeğer buhar miktarının NO_x emisyon miktarını yaklaşık 25 ppm seviyelerine düşüreceğini göstermektedir. Bu çevrimde buhar enjektörünün konumu bu sistemin ve çevrimin düzgün çalışması için çok önemlidir [1].

Bu sistemin en önemli avantajı mevcut sisteme uygulanması için çok fazla değişikliğe ihtiyaç duyulmamasıdır. Yeni nesil gaz türbinlerinde düşük NO_x ve düşük emisyon seviyelerine ulaşmak için DLN ve DLE olarak adlandırılan kuru düşük NO_x ve kuru düşük emisyon yakıcıları kullanılmaktadır. Bu sayede emisyon miktarları 9 ppm seviyelerine düşmektedir. Ayrıca daha düşük emisyon seviyelerine ulaşmak için katalitik konvertörler de kullanılmaktadır [1].

2.4.7. Evaporatif rejeneratif çevrim

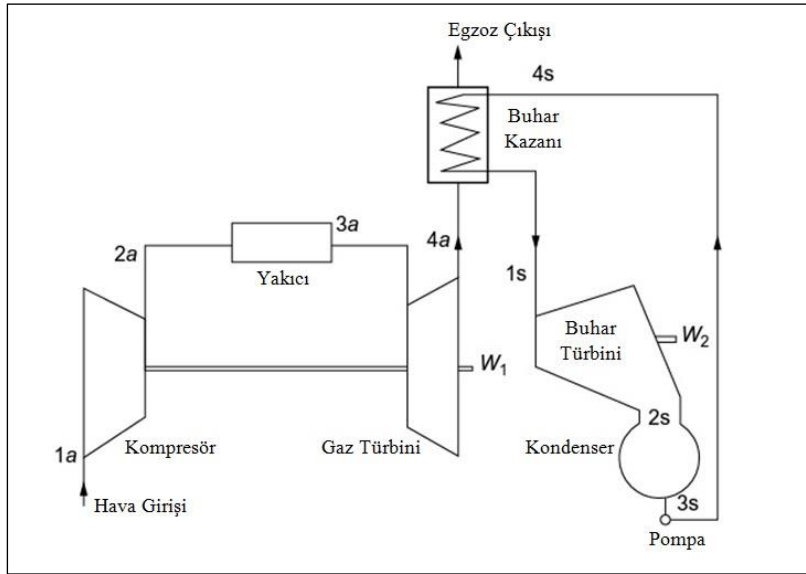
Şekil 2.20’de gösterildiği gibi bu çevrim su enjeksiyonlu rejeneratif bir çevrimdir. Teorik olarak hem buhar enjeksiyonlu hem de rejeneratif sistemlerin NO_x emisyonlarını azaltma ve daha yüksek adyabatik ısı verimlilik avantajlarına sahiptir. Bu sistemin iş çıktısı buhar enjeksiyonlu çevrimde elde edilenle yaklaşık olarak aynıdır, ancak sistemin adyabatik ısı verimliliği çok daha yüksektir. Bu çevrimde, hava akışına su buharı eklemek için kompresör ile rejeneratör arasına yüksek basınçlı bir evaporatör yerleştirilir ve bu süreçte evaporatör bu karışık akışın sıcaklığını düşürür. Karışım daha sonra rejeneratöre daha düşük bir sıcaklıkta girerek rejeneratör boyunca sıcaklık farkını artırır. Sıcaklık farkının artması egzoz gazlarının sıcaklığını önemli ölçüde düşürür, böylece normalde kayıp olan bu egzoz gazları suyu buharlaştırmak için kullanılan dolaylı bir ısı kaynağı olur. Hem hava hem de buharlaşan su rejeneratörden, yanma odasından ve türbinden geçer. Su, 1 bar ve 26,7 °C sıcaklıkta, bir pompa aracılığıyla evaporatöre girer ve buradan kompresörden çıkan hava ile aynı sıcaklıkta ve kompresör çıkışının 4 bar üzerinde bir basınçta buhar olarak çıkar. Daha sonra hava akışına ince bir sis halinde enjekte edilir ve burada tamamen karışır. Rejeneratif çevrime benzer şekilde, evaporatif rejeneratif çevrim daha düşük basınç oranlarında daha yüksek verimliliğe sahiptir. Rejeneratördeki korozyon bu sistemde önemli bir sorundur. Tamamen temiz olmadığında rejeneratörler yangına yol açabilecek sıcak noktalar (hot spots) oluşturma eğilimindedir. Uygun rejeneratör tasarımları ile bu sorunun üstesinden gelinir. Bu çevrimde NO_x emisyonları oldukça düşük seviyelerdedir [1].



Şekil 2.20. Evaporatif rejeneratif çevrim şematik gösterimi [1]

2.4.8. Brayton-Rankine kombine çevrim

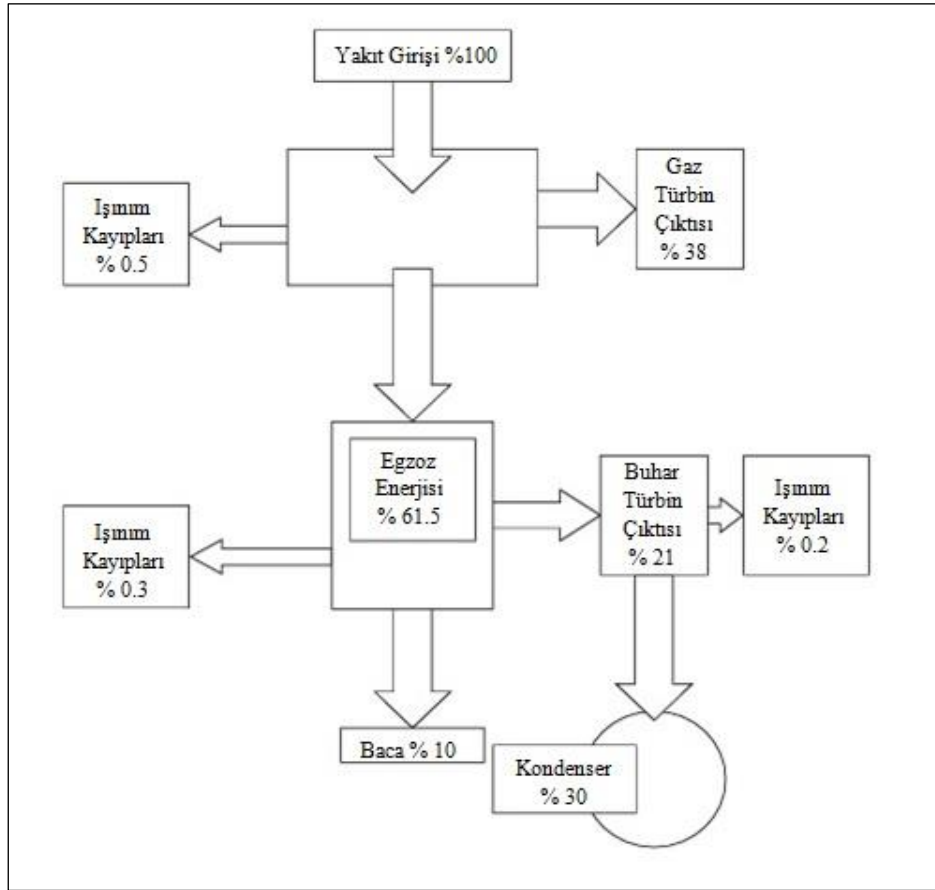
Gaz türbini ve buhar türbini sistemlerinin kullanımı günümüzde birçok elektrik üretim santralinde ve endüstriyel proses tesislerinde kullanılmaktadır. Gaz türbininde meydana gelen yanma sonucu dışarı atılan sıcak egzoz gazlarının, buhar türbini için ısıtılmış buhar oluşturmak amacıyla kullanılmasına dayanan bir sistemdir. Şekil 2.21’de bu çevrimin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.21. Brayton-Rankine kombine çevrim şematik gösterimi [1]

Kombine çevrim işi, net gaz türbini işi ile buhar türbini işinin toplamına eşittir. Tasarım çıktısının yaklaşık üçte biri ile yarısı egzoz gazlarında enerji olarak mevcuttur. Türbinden çıkan egzoz gazı geri kazanım kazanına ısı sağlamak için kullanılır. Dolayısıyla, bu ısı genel çevrime dahil edilir. Bu sistemde net iş, bir buhar enjeksiyon çevriminde beklenenle hemen hemen aynıdır ancak verimlilik çok daha yüksektir. Bu sistemin dezavantajı yüksek kurulum maliyetidir. Bununla birlikte, buhar enjeksiyon çevriminde olduğu gibi, kullanılan gaz türbinine bağlı olarak egzozundaki NO_x hemen hemen aynı düşük seviyelerdedir. Bu çevrim, yüksek adyabatik ısı verimliliği nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

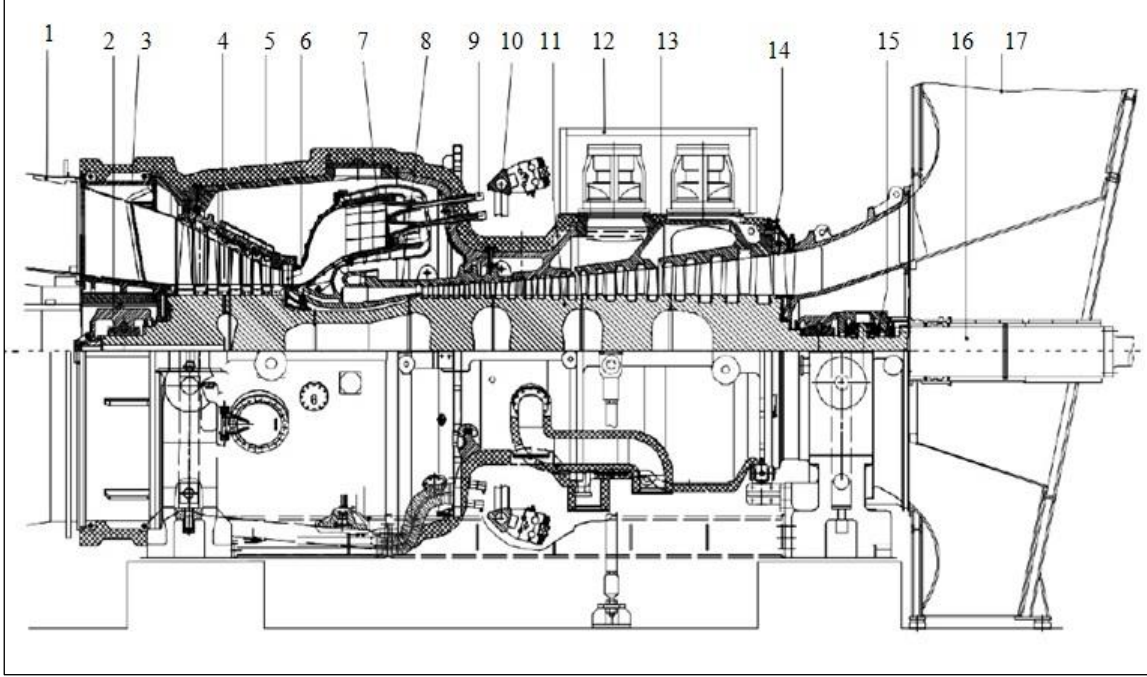
Şekil 2.22’de genel olarak bir kombine çevrim santralinde sisteme giren toplam %100 birim enerjinin faydalı bileşenlerine dağılımı, kondenser ve baca kayıplarıyla ilişkili enerji kayıpları gösterilmektedir. Bu dağılım, daha verimli ekipman, ısı geri kazanım sistemleri ve baca kayıpları azaldıkça değişiklik gösterebilir fakat genel itibarla şekilde gösterilen oranlara yakındır [1].



Şekil 2.22. Kombine çevrim santrali enerji dağılımı akış diyagramı [1]

2.5. Gaz Türbini Ana Bileşenleri

Şekil 2.23'te kesit resmi gösterilen GT13E2 modeli bir gaz türbinine ait ana parçalar Çizelge 2.1'de verilmiştir. Bu gaz türbini modelinde kompresör ve türbin birbirine kaynaklanmış tek bir dövme şaft üzerinde çalışmaktadır. Türbin şaftı 2 adet kaymalı yatak ve 1 adet kılavuz yatak üzerinde dönmektedir. Türbin yatakları sıcak bölgede bulunmamaktadır.



Şekil 2.23. GT13E2 gaz türbini kesit gösterimi [5]

Çizelge 2.1. GT13E2 gaz türbini kesiti parça listesi [5]

Sıra No	Parça Adı	Sıra No	Parça Adı
1	Egzoz difüzörü	10	Yakıt dağıtım sistemi
2	Çıkış kaymalı yatak	11	Rotor
3	Egzoz muhafazası	12	Blöf vanalar
4	Türbin sabit kanat taşıyıcısı	13	Kompresör muhafazası ve kanatlar
5	Türbin muhafazası	14	Ayarlanabilir giriş kılavuz kanatları (IGV)
6	Türbin hareketli ve sabit kanatlar	15	Giriş kaymalı ve kılavuz yataklar
7	Yanma odası	16	Ara şaft
8	Yakıcı iç muhafazası	17	Hava giriş manifoldu
9	Yakıcılar		

Türbin ve kompresör dış muhafazaları döküm malzemeden üretilmiştir ve iki parçalı olarak tasarlanmıştır. İki parçalı tasarım türbin ekseninin her iki tarafına da kolayca ulaşım sağlamaktadır. Gaz türbini çalışma sıcaklıklarında özellikle sıcak gaz yolunda bulunan parçaların soğutulması için hava soğutmalı sistem bulunmaktadır. Bu sistem; türbin ilk 3 kademe hareketli kanatlar ve ilk 2 kademe sabit kanatlarda bulunmaktadır. Türbinde toplam 5 kademe hareketli ve sabit kanatlar bulunmaktadır. Ayrıca kompresör tahliyesinden çıkan hava ile rotor ve kanat taşıyıcısı soğutulmaktadır. Yanma odasında toplam 72 adet çevresel yakıcı bulunmaktadır. Bu çevresel yakıcıların sayısı ve konumlandırılması homojen bir sıcaklık dağılımı ve tam yanma sağlamaktadır. GT13E2 modeli gaz türbinlerinde fuel-oil ve doğalgaz yakıtlarının her ikisi de kullanılarak enerji üretilebilmektedir [5].

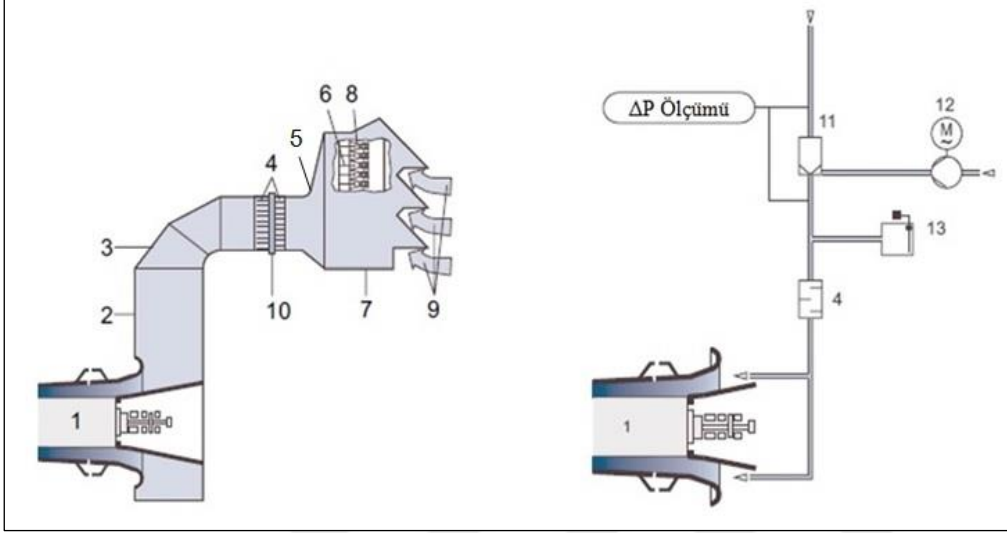
Kompresörde toplam 21 kademe bulunmaktadır. Kompresör kanatları çevresel T yuvalarına ara parçalarla birlikte sabitlenmiştir. Kompresörün ilk 5 kademesindeki kanatlar erozyon ve korozyon etkilerine karşı kaplanmıştır. Şaftın, türbin bölgesinde meydana gelen yüksek ısıdan etkilenmemesi için yüzeyi ısı kalkanı segmentleri ile kaplanmıştır. Kompresörün tahliye ucundan alınan hava bu segmentler için ek soğutma sağlamaktadır. Bu hava aynı zamanda türbin kanatlarının ilk üç sırasını soğutmak için de kullanılır [5].

2.5.1. Hava giriş ve filtre sistemi

Gaz türbinleri, çalışma sırasında buldukları ortamın havasını yoğun miktarda sisteme alırlar. Ortam havası sisteme girerken, havanın içerisinde bulunan kirleticilerden en iyi seviyede arındırılmış olması gerekmektedir. Giriş havasının kalitesi sistem performansı ve ömrü için önemli bir parametredir. Hava içerisinde bulunan partiküller ve kirleticiler kompresör ve gaz türbin parçalarında aşınma, korozyon, oksidasyon ve degradasyona neden olabilmektedir.

Gaz türbinlerinde kullanılan filtre sistemlerinde bariyer, kendi kendini temizleme sistemi, vana, seperatörler ve ızgara uygulamaları bulunmaktadır. Kara tabanlı uygulamalar için çoğunlukla ya bariyer filtreler ya da kendi kendini temizleyen filtre sistemleri kullanılır. Kendi kendini temizleyen filtre sistemleri esasen filtre malzemesini darbeli olarak temizlemek için ara sıra basınçlı hava kullanımına izin veren bariyer filtrelerdir [6].

Şekil 2.24'te kesit resmi gösterilen GT13E2 modeli bir gaz türbinine ait hava giriş ve filtre sistemi parçaları Çizelge 2.2'de verilmiştir. Şekil 2.24'te gösterilen gaz türbini giriş havası filtre sistemi yoğun toz ortamlarında (çöl) kullanılabilir şekilde dizayn edilmiştir. Ayrıca bu sistem düşük toz yoğunluklu soğuk kutup ortamlarına da uygundur.



Şekil 2.24. GT13E2 gaz türbini hava giriş ve filtre sistemi [5]

Çizelge 2.2. Gaz türbini hava giriş ve filtre sistemi parça listesi [5]

Sıra No	Parça Adı	Sıra No	Parça Adı
1	Kompresör	8	Filtre elemanları
2	Giriş manifoldu	9	Hava girişi
3	Giriş dirseği	10	Genleşme flanşı
4	Susturucu	11	Pulse filtre
5	Bağlantı konisi	12	Pulse havası kompresörü
6	Filtre temizleme havası	13	By-pass kapağı
7	Filtre muhafazası		

Kendi kendini temizleme özelliğine sahip bu sistemde ana akışın tersi yönde kısa bir basınçlı hava jeti vasıtasıyla çalışma sırasında filtre elemanlarının otomatik olarak kontrollü bir şekilde temizlenmesi sağlanır. Filtre kartuşlarının kirlenme derecesi ise basınç farkı (diferansiyel basınç) ölçümü ile izlenir. Filtre elemanları, basınç farkı önceden ayarlanan seviyeye ulaştıktan sonra veya sabit zaman aralıklarında otomatik olarak temizlenir. Filtreyi ve filtre muhafazasını aşırı diferansiyel basınçtan (toz veya kar yağışı nedeniyle filtrenin tıkanması nedeniyle) korumak için filtre muhafazasında filtreden aşağı yönde baypas kapakları bulunur. Gaz türbinlerinde giriş hava kalitesi sistemin performansı ve ömrü için

çok önemli bir parametre olması nedeniyle gaz türbinlerinin çalışma ortamlarına göre hava giriş ve filtrasyon sistemleri özel olarak dizayn edilmektedir. Ortam havasındaki kirleticilerin etkilerinin zaman içerisinde türbin parçaları ve malzemelerinde ortaya çıkardığı değişimlere göre her geçen gün filtre sistemlerinde teknolojik gelişmeler ve yeni tasarımlar uygulanmaktadır [5].

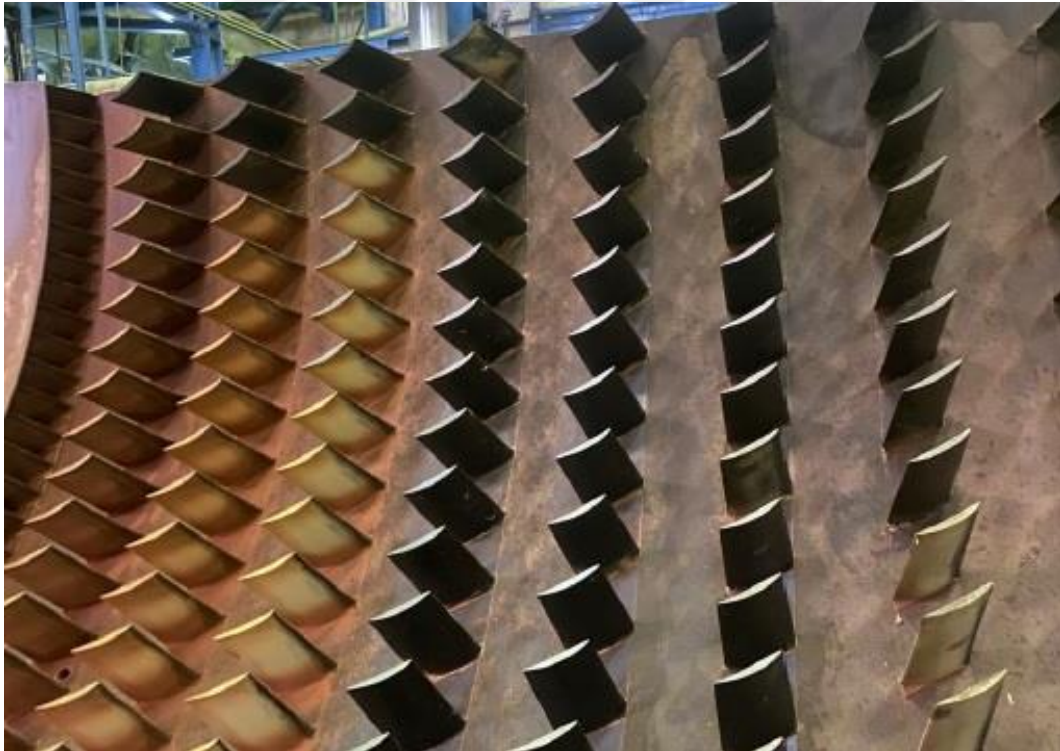
2.5.2. Kompresör

Gaz türbini uygulamalarında genellikle (5 MW üzeri) aksenal akışlı kompresörler kullanılmaktadır. Bu kompresörler, akışın kompresöre aksenal yönde girdiği ve gaz türbininden yine aksenal yönde çıktığı bir yapıya sahiptirler. Aksenal akışlı kompresörler, akışkanı hızlandırarak ve basınç artışı elde etmek için yayılmasını sağlayarak çalışma akışkanını sıkıştırırlar. Kanatçıklar sayesinde akışkan hızlandırılır ve basınç artışı elde edilir. Kompresörler birden fazla kademeye sahiptir ve her kademede bir rotor-stator kombinasyonu bulunmaktadır. Resim 2.2’de kompresör rotoru ve Resim 2.3’te kompresör statoru ve üzerindeki sabit kanatçıklar gösterilmektedir. Kompresör girişinde ise ilave bir sıra değişken hareketli kanat olan “Ayarlanabilir giriş kılavuz kanatları (IGV)” kullanılmakta ve bu kanatlar akış açısını kontrol etmektedir. Ayrıca kompresörün çıkışında da başka bir kanat setinden oluşan bir difüzör bulunur ve bu difüzör akışkanı daha da dağıtarak yanma odalarına giriş hızını kontrol etmektedir.

Eksenal akışlı bir kompresörde hava bir kademedен diğerine geçerken her kademede basınç bir miktar yükseltmektedir. Birden fazla kademenin kullanılması, bazı havacılık ve uzay uygulamalarında 40:1’e kadar genel basınç artışlarına ve bazı endüstriyel uygulamalarda 30:1’lik bir basınç oranına izin vermektedir [1].



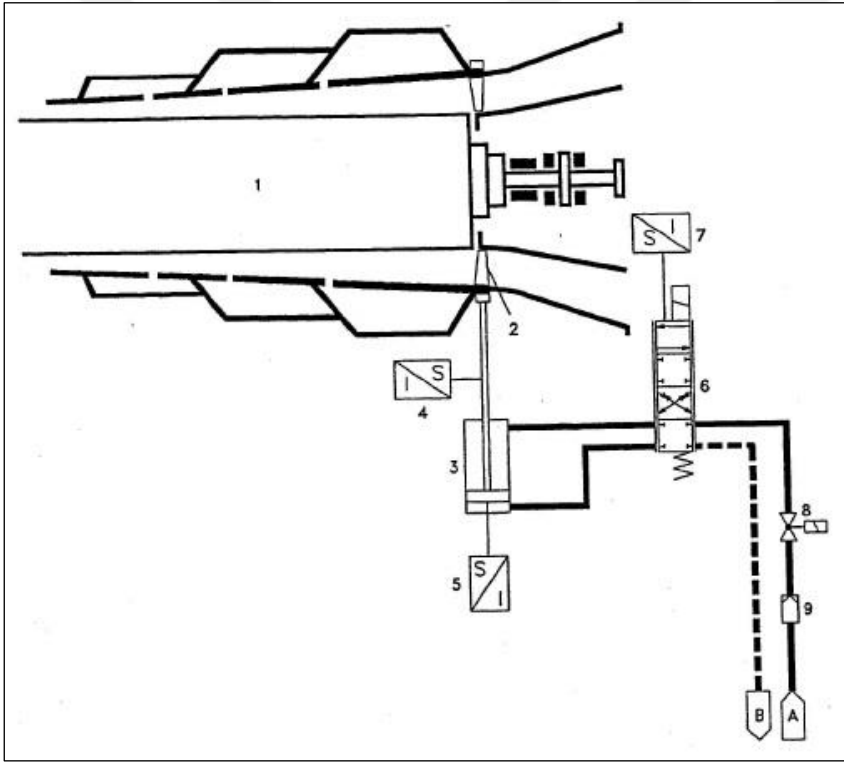
Resim 2.2. GT13E2 gaz türbini kompresör rotoru [7]



Resim 2.3. GT13E2 gaz türbini kompresör statoru sabit kanatçıklar [7]

2.5.3. Ayarlanabilir giriş kılavuz kanatları (IGV)

Gaz türbini uygulamalarında aksel akışlı kompresörlerin girişindeki akışı ayarlamak ve kısmi yükte çalışmalarda optimum verimliliği sağlamak için “Ayarlanabilir giriş kılavuz kanatları (IGV)” sistemi kullanılmaktadır. Gaz türbini çalışırken IGV sistemi bir kontrol devresi aracılığıyla otomatik olarak konumunu ayarlamaktadır. Bu çalışma sistematığının kullandığı parametreler ise egzoz gazının izin verilebilen maksimum sıcaklığı ile istenilen yükte sistemin optimum verimliliğini sağlamak üzere kodlanmıştır. Şekil 2.25’te kesit resmi gösterilen GT13E2 modeli bir gaz türbinine IGV sistemi ve bu sisteme ait parçalar Çizelge 2.3’te verilmiştir.



Şekil 2.25. GT13E2 gaz türbini IGV sistemi [5]

Çizelge 2.3. GT13E2 gaz türbini IGV sistemi parça listesi [5]

Sıra No	Parça Adı	Sıra No	Parça Adı
1	Kompresör	7	Kontrol vanası ayarının ölçümü
2	Değişken giriş kılavuz kanat dizisi	8	Pilot valf
3	Lineer (doğrusal) tahrik	9	Filtre
4	Kanat açısı ölçümü	A	Yağ besleme hattı
5	Lineer tahrik ayarının ölçümü	B	Yağ geri dönüş hattı
6	Lineer tahrik için kontrol vanası		

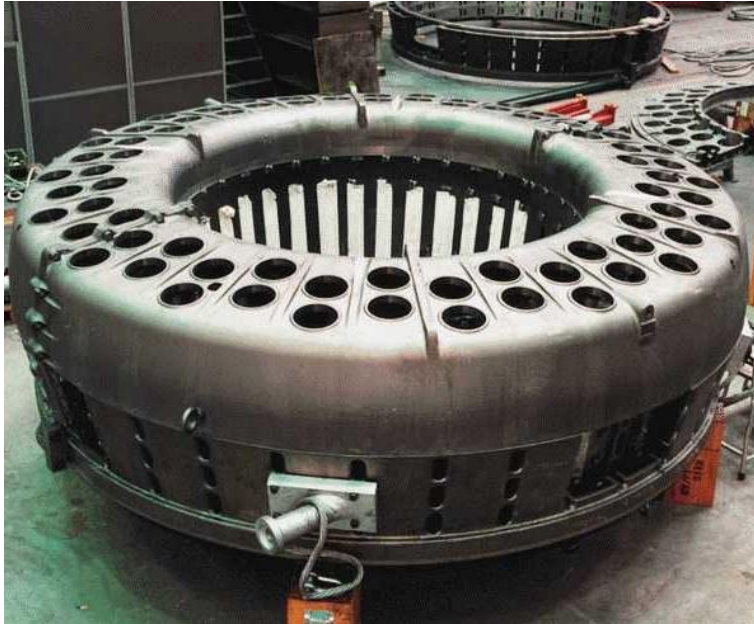
IGV sisteminin çalışma mantığı şu şekildedir:

Giriş kılavuz kanatları gaz türbini dururken kapalıdır. Gaz türbini çalıştırıldığında ise kanatlar önceden tanımlanmış başlangıç konumuna açılmaktadır. Tam yük için türbin giriş sıcaklığı elde edilmez veya egzoz gazı sıcaklığı izin verilen maksimum seviyeye ulaşmaz giriş kılavuz kanadı normal konumuna açılmaya başlar. Kontrol parametresi ya türbin giriş sıcaklığının sabitliği ya da izin verilen maksimum türbin çıkış sıcaklığıdır. Tam yükte çalışma sırasında, giriş kılavuz kanatları normal konumundadır. Gaz türbininin normal bir şekilde kapatılması veya yükünün boşaltılması sırasında giriş kılavuz kanatları başlatma veya yükleme sırasında izlenen yönün tersine yönlendirilir [5].

2.5.4. Yanma odası ve yakıcılar

Brayton çevrimi temelinde çalışan gaz türbinlerinde ısı girdisi yanma odası tarafından sağlanır. Yanma odası, kompresörden gelen belirli bir sıcaklık ve basınçtaki havayı alarak ideal koşullarda herhangi bir basınç kaybı olmadan yüksek sıcaklıkta türbine gönderir. Yanma odası, yakıtın üst ve alt ısıl değerlerine bağlı olarak kompresör tahliye havasının yaklaşık %8 ile %30'u arasında neredeyse stokiometrik olarak yakıldığı doğrudan ateşlemeli bir hava ısıtıcıdır. Tüm gaz türbini yanma odaları yüksek basınçlı gazın sıcaklığını arttırarak aynı işlevi yerine getirmektedir. Yanma odası giriş sıcaklığı basınç oranına, yüke, türbin tipine ve özellikle düşük basınç oranlarında türbinin rejeneratif olup olmamasına bağlıdır. Yanma odası performansı; verimlilik, meydana gelen basınç düşüşü ve yanma odası çıkış sıcaklık profiline düzgünlüğü ile ölçülmektedir. Yanma verimliliği, yanmanın tamlığının bir ölçüsüdür. Yanma tamlığı yakıt tüketimini doğrudan etkilemektedir, çünkü yanmamış yakıtın ısıl değeri türbin giriş sıcaklığını arttırmak için kullanılamamaktadır. Normal yanma sıcaklıkları 3400 °F (1871 °C) ile 3500 °F (1927 °C) arasında değişmektedir.

Bu sıcaklıkta, yanma gazındaki NO_x hacmi yaklaşık %0,01'dir. Yanma sıcaklığı düşürülürse, NO_x miktarı önemli ölçüde azalmaktadır. Doğalgaz kullanımı ve yeni kuru düşük NO_x yakıcılarının kullanımı NO_x seviyelerini 10 ppm'nin altına düşürmektedir. Devletlerin yasal düzenlemeleri NO_x emisyonlarını sınırlandırmayı gerektirdiği için NO_x emisyon seviyelerini düşürmek için buhar veya su enjeksiyonu yöntemleri de geçmişten günümüze kadar kullanılmıştır [1].



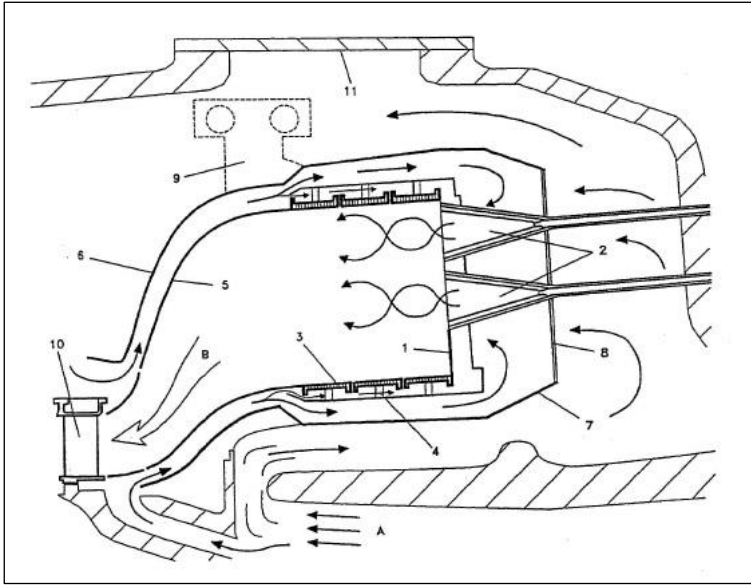
Resim 2.4. GT13E2 gaz türbini dairesel yanma odası [5]

Resim 2.4'te GT13E2 gaz türbini dairesel yanma odası yakıcı ringi gösterilmektedir. Yanma odasındaki yakıcılar türbin muhafazası içinde, kompresör ve türbin arasındaki resimde gösterilen yakıcı ringine monte edilmiştir. Bu yakıcı ringi, gerçek yanmanın gerçekleştiği birincil bölge ve sıcak gazı çok az kayıpla türbine gönderen bir ikincil bölgeden oluşmaktadır. İkincil bölge yüksek sıcaklığa dayanıklı plakalardan oluşmaktadır. Şekil 2.26'da yanma odasının kesit resmi ve Çizelge 2.4'te sistemdeki parçalar gösterilmektedir.

Birincil bölge, içlerine EV yakıcıları (2) yerleştirilmiş ön segmentler (1) ve bunların üstüne ve altına takılmış ısı yalıtım segmentlerinden (3) oluşmaktadır. Bu parçalar, türbin gövdesine bağlantıyı sağlayan bir destek yapısı (4) tarafından yerlerine sabitlenmiştir. İkincil bölge yüksek sıcaklığa dayanıklı plakalardan oluşmaktadır [5].

Birincil ve ikincil bölge muhafazaları (6,7), kompresörün çıkışından çekilen soğutma havasını ters akışlı soğutmada yanma odasının dışına yönlendirmek için yanma odasını tamamen çevrelemektedir. Birincil bölgede EV yakıcıları da yer almaktadır [5].

Kompresör havası (A) kompresör difüzöründen geçtikten sonra, döner kanatlar tarafından türbin gövdesinin çevresindeki odaya yönlendirilir. Bunu yaparken, sadece yakıcı için karşı akışlı soğutma sağlamakla kalmaz, aynı zamanda türbin kanat taşıyıcısını da soğutur. Yanma odasının yakıcı ucundaki kapak plakası (8), kompresörün ucundan gelen havanın EV yakıcılarına ulaşabileceği deliklere sahiptir [5].



Şekil 2.26. GT13E2 gaz türbini yanma odası kesit gösterimi [5]

Çizelge 2.4. GT13E2 gaz türbini yanma odası parça listesi [5]

Sıra No	Parça Adı	Sıra No	Parça Adı
1	Ön segment	7	Yanma odası muhafazası (birincil bölüm)
2	EV yakıcı	8	Kapak plakası
3	Isı yalıtım segmentleri	9	Yanma odası askısı
4	Destek yapısı	10	Türbin 1. kademe sabit kanat
5	Yüksek sıcaklık mantolama yapısı	A	Kompresör çıkışı gelen hava
6	Yanma odası muhafazası (ikincil bölüm)	B	Sıcak gaz

2.5.5. EV (çevresel girdap) yakıcılar

Resim 2.5'te gösterilen GT13E2 gaz türbinlerinde kullanılan EV yakıcı, düşük NO_x özellikli, basit bir tasarıma sahip, güçlü girdap akımlı bir ön karışimli yakıcıdır. EV yakıcı, aksenel olarak bölünmüş ve iki yarısı birbirinden çapraz olarak yer değiştirmiş içi boş bir koniden oluşmaktadır. Yanma havası, ortaya çıkan yarıklardan yanma bölgesine akmaktadır. GT13E2 gaz türbinlerindeki dairesel yanma odası, türbinden önce eşit sıcaklık dağılımı sağlamaktadır. Bu yanma odasında toplam 72 EV yakıcı bulunmaktadır. Bu yakıcılar ikili çiftler halinde yerleştirilmiştir. Tek dairesel yanma odası ve yakıcıların yerleşimi sıcak gazın çok iyi karışmasını sağlamaktadır. EV yakıcılar sayesinde sıcak gazın homojen yayılımı sağlanmaktadır. EV yakıcılarda 2. nesil yağsız bir ön karışım teknolojisi ve kısa alev oluşturma yeteneği bulunmaktadır. Ayrıca kısmi yükte çalışma sırasında 4 yakıcıdan biri kapatılarak avantajlı sıcaklık profili düşük yüklerde bile muhafaza edilebilmektedir [5].



Resim 2.5. GT13E2 gaz türbini EV yakıcısı [5]



3. GAZ TÜRBİNLERİNDE DEGRADASYON

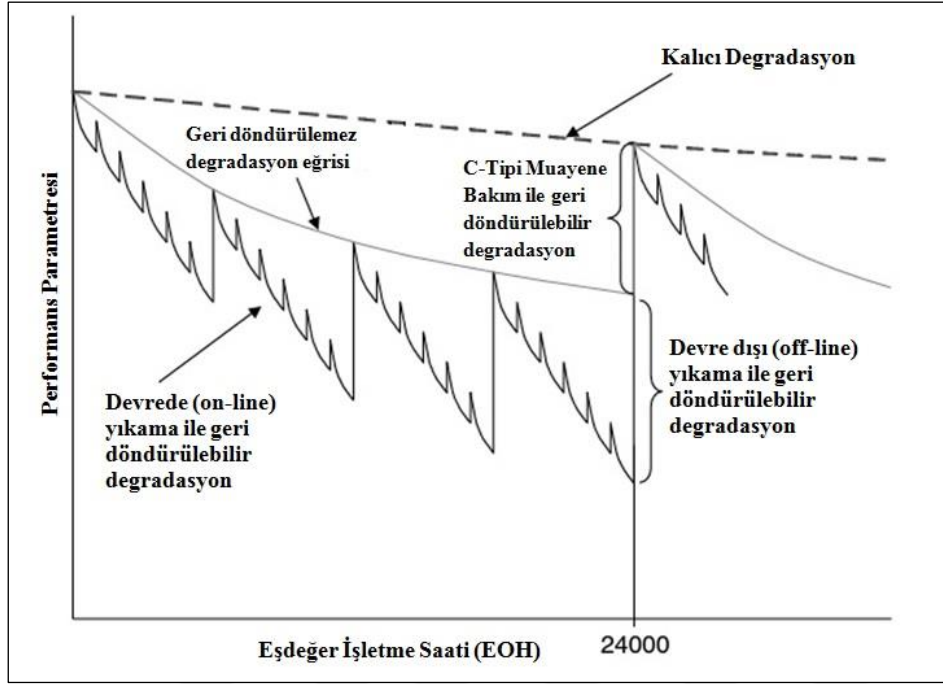
3.1. Genel

Her güç ünitesi zaman içinde degradasyon (bozulma) etkilerini hisseder. Degradasyonun herhangi bir makinenin performansı üzerindeki etkilerini tahmin etme sorunu günümüzün en önemli tartışma konusudur. Bir gaz türbininin işlevi birçok farklı bileşenin hassas şekilde bir araya gelmesinin bir sonucu olduğundan izole bileşenlerden ziyade bir sistem olarak tüm gaz türbini sistemini ele almak gerekmektedir. Gaz türbininin bir sistem olarak ele alınması, degradasyonun tüm bileşenlerin uyumu üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır [8].

Gaz türbini sistemini ele aldığımızda, hava girişi, difüzör, kompresör, türbin ve egzoz bölümlerindeki tüm bileşen ve parçalar zaman içerisinde degradasyona maruz kalarak tüm sistemin bu durumdan etkilenmesi kaçınılmazdır. Gaz türbini sistemindeki yüksek basınç, nem, yüksek sıcaklık, kirlenme ve aşınmaya doğrudan veya dolaylı olarak maruz kalan tüm bileşenler zaman içerisinde çeşitli degradasyon faktörlerinden etkilenmektedir. Degradasyona sebep olan birçok farklı mekanizma bulunmaktadır.

Gaz türbini kanatları, çalışması sırasında boyutsal ve metalürjik degradasyona maruz kalmaktadır. Boyutsal degradasyon; aşınma, çentikler, oyuklar, sıcak korozyon ve kanatlardaki kaplamanın hasarlanarak sıyırılması veya yeniden kaplanmış kanatlardaki kaplamanın yeterince yapışmamış olmasından dolayı ortaya çıkmaktadır. Metalürjik degradasyon ise esas olarak malzeme yaşlanması, yorulma ve yüksek sıcaklıkta sürünmeden kaynaklanır [9].

Kirlenme, korozyon, oksidasyon, erozyon ve sürtünmenin etkileri gaz türbini sisteminin bir bütün olarak degradasyona uğramasına veya zaman içerisinde güç ve verimliliğinin azalmasına önemli ölçüde katkıda bulunur. Degradasyonun performans üzerindeki tipik etkisi Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Şekil 3.1.'de genel bir yaklaşım sağlamak amacıyla devrede ve devre dışı temizlik (yıkama) ve bir C tipi muayene veya bakımın degradasyon etkileri yönüyle olası performans iyileştirmeleri ortaya konulmuştur.



Şekil 3.1. Gaz türbini eşdeğer işletme saatine göre performans degradasyonu [10]

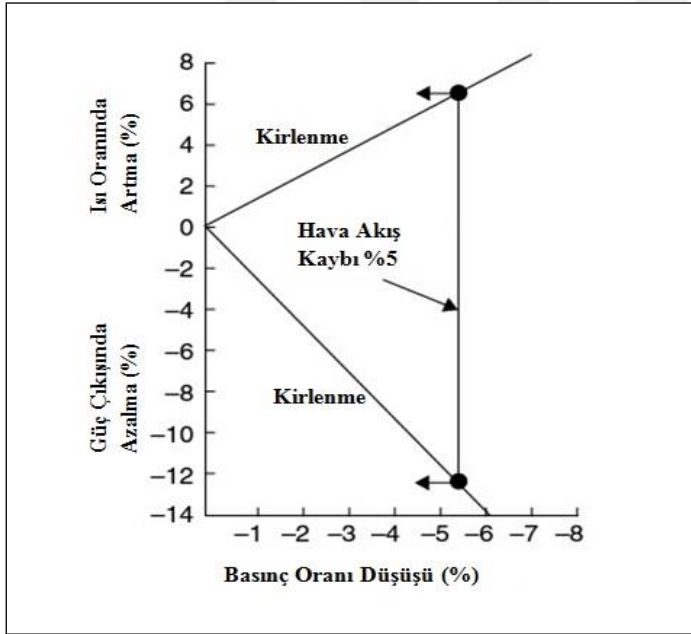
3.2. Kirlenme (Fouling)

Kirlenme, partiküllerin kanat profillerine ve dairesel yüzeylere yapışmasından kaynaklanmaktadır. Yapışmaya yağ veya su buharı neden olmaktadır. Bunun sonucunda, yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olan ve bir dereceye kadar kanat profilini değiştiren bir malzeme birikimi meydana gelmektedir. Kirlenmeye neden olan parçacıklar tipik olarak 2 ila 10 μm 'den daha küçüktür. Duman, yağ buharı, karbon ve deniz tuzları yaygın örneklerdir [8].

Gaz türbini sisteminde kirlenmeye neden olan en önemli faktör sisteme giren havadır. Bir gaz türbininde üretilen her bir megavat güç için dakikada yaklaşık 200-255 m^3 havanın sisteme girdiği değerlendirildiğinde giriş havasının kirlenmeyi önleyecek düzeyde iyi filtrelenmesi gerekmektedir [1]. Filtre üreticileri 2 μm 'den de küçük partikülleri önleyecek mikro ve nano fiber filtre tasarımları geliştirmektedirler. Bu tasarımlar geliştirilirken bir yandan da filtre ortamlarında özellikle nemli bölgelerde ortaya çıkan yoğuşmanın giriş hava basınçlarını düşüren ve sistem performansını azaltan bir unsur olma durumunu da göz ardı etmemek gerekmektedir.

Yüksek basınç oranlı kompresöre sahip bir gaz türbini sisteminde kirlenme nedeniyle özellikle kanatlarda aşırı basınç yükselmesi ve bunun sonucunda kanatlara gelen kuvvetlerin artarak kanatlarda hasar ve kırılmalar ortaya çıkabilmektedir.

Kompresör dalgalanması, akışın kompresör kanatları boyunca yanma sisteminden ters moda geçtiği bir akış etkisidir. Bu durum, yüksek aerodinamik hızlarda (yüksek mekanik hız ve/veya düşük ortam sıcaklıkları) çalışan bir kompresörün belirli bir basınç oranını sağlaması gerektiğinde ortaya çıkmaktadır. Kirlenme meydana gelmişse, bu basınç oranı arka kademeler için çok yüksek olabilmekte ve aşırı yüklenmeye neden olmaktadır. Aynı etki düşük aerodinamik hızlarda (düşük mekanik hız ve/veya yüksek ortam sıcaklıkları) çalışan bir kompresörün belirli bir basınç oranı sağlaması gerektiğinde de meydana gelebilmektedir. Bu durumda da, kirlenme meydana gelmişse aşırı yüksek basınç oranına maruz kalabilen ve aşırı yüklenen ön kademe kanatları olacaktır [10].

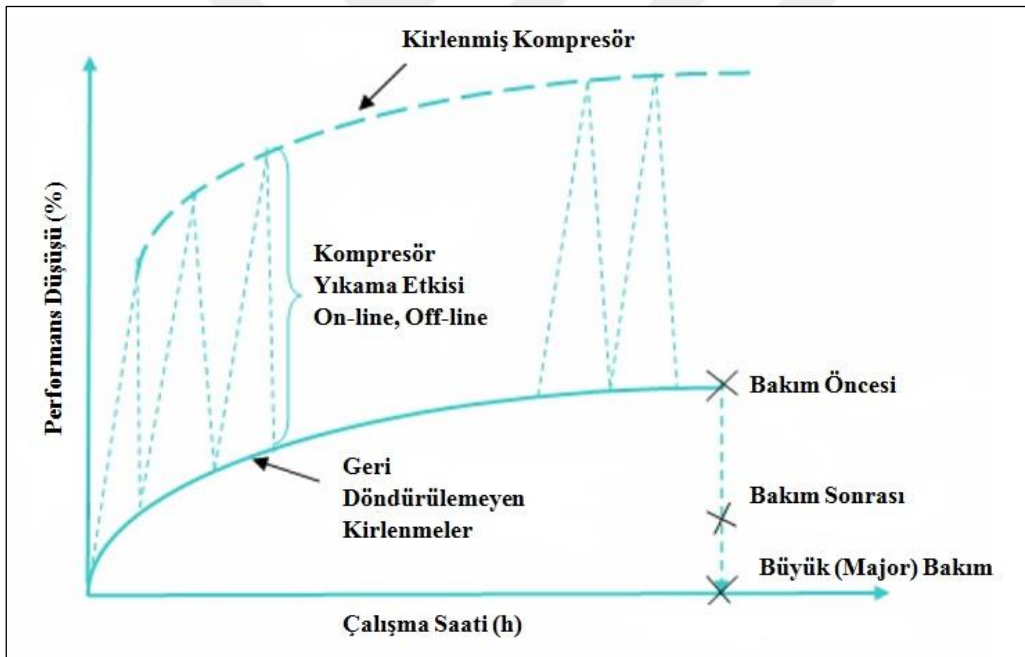


Şekil 3.2. Kirlenmenin ısı katsayısı, basınç oranı ve güç çıkışına etkisi [12]

Tipik bir aksenal kompresör için yapılan hesaplamalar kanat kirlenmesi ve artan boşlukların etkilerinin basınç oranı kaybına, verimlilik kaybına, menzil veya durma marjı kaybına yol açtığını ortaya koymaktadır. Özellikle, artan açıklıklar daha düşük bir akışta boğulmaya neden olarak kompresörden geçen maksimum akışın azalmasına yol açmaktadır. Kirlenmenin ısı katsayısı, güç çıkışı ve kompresör basınç oranına etkilerini gösteren grafik Şekil 3.2'de %5 hava giriş kaybına göre oluşturulmuştur [11].

Genellikle havadaki kirleticiler kompresör kanat yüzeylerine yapışır. Bu kirleticiler; havadaki tuz, endüstriyel kirlilik, egzoz emisyonları, egzoz ve yağ buharları, kireçtaşı, kömür, toz ve çimento tozu gibi mineral birikintileri, böcekler, çeşitli kaynaklardan gelen kirlı su, buhar ve tarımsal partiküllerdir. Yağ sızıntısı gibi kirlenme etkenlerinin diğer kirleticilerle kombinasyonu ciddi performans kaybına neden olmaktadır [9].

Kompresör kirlenmesindeki performans düşüşünün büyük bir kısmı kompresörün sık sık yıkanmasıyla geri kazanılabilmektedir. Fakat yıkama ile telafi edilemeyen performans düşüşü kayıplarını geri kazanmak veya performans düşüşünü önlemek için sisteme bakım yapılması gerekmektedir. Bunun yanında literatürde major overhaul olarak adlandırılan büyük bakımda ise akış yolundaki parçalarının tamamen yenilenmesinden sonra kalıcı performans düşüklüğü ortadan kaldırılabilmektedir. Şekil 3.3'te kirlenmeye bağlı performans düşüşü gösterilmektedir [13].



Şekil 3.3. Kirlenmeye bağlı performans düşüşü [13]

Kirlenmenin yoğun olduğu ortamda çalışma sırasında, tortu ve kalıntı birikiminin, bir gaz türbininin performansında %70-80'e kadar düşüşe neden olabileceği tahmin edilmektedir [14]. Performans kaybı, partiküllerin ilk birkaç kompresör kademesinin kanatlarına ve yüzeylerine yapışarak bunların etrafında yeni bir malzeme tabakası oluşturmasından kaynaklanır. Bu durum yüzey pürüzlülüğünü artırarak daha kalın bir sınır tabakasına ve daha küçük bir etkili akış alanına neden olur. Bu akış değişiklikleri hava akış kapasitesinin

azalmasına, verimliliğin düşmesine ve daha düşük bir dalgalanma çizgisine neden olacaktır. Kirlenmenin sonuçlarının üstesinden gelmek için, sabit bir güç çıkışını korumak amacıyla ateşleme sıcaklıkları genellikle artırılır. Bu da emisyonların artmasına ve sıcak bölüm sürünme ömrünün azalmasına neden olur [12].

Ayrıca türbin kanatlarında kirlenme sonucu soğutma deliklerinin tıkanması ve bunun neticesinde kanatlarda aşırı sıcaklık yükselmeleri ortaya çıkabilmektedir. Sıcaklığın aşırı yükselmesi, türbin kanat malzemesi ve yüzey kaplaması için hiçbir şekilde istenmeyen bir durumdur.

Kirlenmeyi önlemek için sıklıkla kullanılan yöntemler şu şekildedir [15]:

- Elle (manuel) temizleme
- Aşındırıcı ile temizleme
- Devre dışı (off-line) yıkama
- Devrede (on-line) yıkama

3.2.1. Elle (manuel) temizleme

Bu yöntemde fırça ve deterjan kullanılarak elle (manuel) temizleme işlemi yapılır. Temizleme işlemi için ünite devreden çıkarılır ve soğuması beklenir. Özellikle gaz türbinlerinin bakımları sırasında kompresör ünitesinin de sökülerek yapılan gözle muayene işleminin ardından temizlik personeli tarafından yapılan işlemdir [9]. Bu temizlik işlemi sırasında, kanatlarda meydana gelmiş olan erozyon, korozyon, çatlak vb. diğer kusurlar da tespit edilebilmektedir [14]. Yöntem olarak zaman alan bir işlemdir fakat etkili bir temizleme çözümü sunar.

3.2.2. Aşındırıcı ile temizleme

Kompresör kanatlarını temizlemek için kullanılan ilk ve en eski yöntemlerden biridir. Bu yöntemde pirinç, odun kömürü ve fındık kabuğu gibi aşındırıcı organik maddeler gaz türbini normal hızda çalışırken sisteme enjekte edilir. Enjekte edilen partiküllerin kompresör kanatlarına çarparak tortuları gidermesi amaçlanır. Temizlik maddelerinin havada kalabilmesi için partikül boyutlarının oldukça küçük olması gerekmektedir. Bu yöntemin ana avantajı düşük maliyetli olmasıdır. Ünitenin devreden çıkarılmasına gerek yoktur ve bu nedenle gelir kaybı olmadan uygulanabilmektedir. Bu tekniğe bağlı olarak; erozyon ve

kompresör kaplamasında hasar riski bulunmaktadır. Bu risk, yüksek hızda çalışan ve daha keskin kanat profilleri olan modern kompresörlerde daha yüksektir [9].

3.2.3. Devre dışı (off-line) yıkama

Bu işlem gaz türbini krank hızında (nominal değer %20-30'u) dönerken gerçekleştirilmektedir. Gaz türbini durdurulduğunda temizleme sıvısı enjekte edilir. Kısa bir ıslatma süresinden sonra rotor krank hızına çıkarılır. Ardından yıkama sisteminin nozülleri sulu yıkama solventini enjekte eder. Yıkama sıvısının enjekte edilmesi, girişe takılan püskürtme nozullarının kullanılması yoluyla gerçekleştirilir. İşlemin son adımı demineralize, deiyonize su ile durulama döngüsüdür. Tüm işlemler ihtiyaca bağlı olarak birkaç kez tekrarlanabilmektedir. Temizleme sıvısının türü kirlenmenin niteliğine bağlıdır. Tortular yağlı veya gresli olduğunda daha etkili bir temizleme için solvent bazlı yıkama sıvısı kullanılmalıdır. Yıkama bittikten sonra kirli ve atık suyun boşaltılması önemlidir. Atık suyun yanma odası ve kompresör gövdesi gibi kritik alanlara girmemesi gerekmektedir. Bu alanların iyi yalıtılması ve buralarda tahliye noktalarının iyi konumlandırılması gerekmektedir. Devre dışı (off-line) yıkama çok etkili ve ucuz bir yöntemdir. Ancak, tesisin devreden çıkarılması ve soğumaya bırakılması gerektiği göz önüne alındığında sürekli çalışan bir santralde duruş planına göre gerçekleştirilmelidir. Aksi takdirde, duruş süresince oluşacak üretim kayıpları değerlendirildiğinde çok yüksek maliyetli bir yöntem dönüşebilecektir [9].

3.2.4. Devrede (on-line) yıkama

Gaz türbinlerinin sürekli devrede olduğu değerlendirildiğinde, yıkama için durdurma üretim kaybı açısından çok maliyetlidir. Bu yüzden devrede (on-line) kompresör yıkama işlemi en çok tercih edilen yöntemdir. Bu yöntem, ünite yüksek güçte çalışırken üretim kaybı olmadan kompresör temizliğine izin verir. Düşük maliyeti göz önüne alındığında, genellikle bir önleyici bakım yaklaşımı olarak çok sık uygulanabilmektedir. Bu bağlamda, kirlenmeye sebep olabilecek kalıntıların yapışma oranını azaltmak için yıkama sıvısına kirlenmeyi önleyici maddeler dahil etmek mümkündür [9].

Bu yöntemde, deterjanlı veya deterjansız demineralize su özel yapım nozullardan sisteme enjekte edilir. Bu nozullar ve ilgili ekipman özel olarak üretilebilir veya türbin üreticisi tarafından tesis kurulumunda tedarik edilebilir.

Bu yöntemde, damlacık boyutu çok önemlidir. Büyük damlacıklar daha iyi bir mekanik temizleme etkisine sahiptir ancak erozyona sebebiyet verme olasılığı yüksektir. Küçük damlacıklar ise dönen kanatlar tarafından santrifüjlenmeye daha az eğilimlidir ve hava akımı tarafından daha çabuk hızlandırılabilir ancak daha çabuk buharlaşma olasılığı bulunmaktadır. Damlacık boyutu tipik olarak 50-250 µm aralığındadır [16]. Damlacık boyutu sıvı basıncına ve nozül tasarımına bağlıdır. Daha geniş bir kapsama alanı elde etmek için genellikle fanlı püskürtme nozulları kullanılır [17].

3.3. Korozyon

Korozyon, metalin bulunduğu ortamla kimyasal reaksiyona girmesi sonucu yüzey metallerin aşınmasıdır. Genellikle metal havadaki oksijenle reaksiyona girer, ancak farklı korozyon mekanizmalarına katılabilecek başka birçok kimyasal reaksiyon da vardır. Bazı korozyon türleri (oksidasyon, sülfatlaşma ve sıcak korozyon gibi) esas olarak gaz türbininin sıcak bölümüne etki etmektedir. Aralık korozyonu ve çukurcuk korozyonu gibi diğer türler daha çok gaz türbininin kompresör bölümünde bulunur.

Gaz türbini uygulamaları için en önemli korozyon mekanizmaları şunlardır [18]:

Oksidasyon, tip 1 sıcak korozyon, tip 2 sıcak korozyon, çukurcuk korozyonu ve aralık korozyonu. Bu mekanizmalar gaz türbinleri için oldukça önemlidir ve türbinlerin ömrünü ve performansını etkileyebilmektedir [19].

Korozyona hem giriş havası kirleticileri hem de yakıt, su veya yanma kaynaklı kirleticiler neden olabilmektedir. Yakıt kaynaklı korozyon, yanma sonrasında aşındırıcı tortular bırakan sıvı yakıtlardaki kirlilikler ve katkı maddeleri nedeniyle fuel-oil ve damıtılmış ürünlerde doğal gaza kıyasla tipik olarak daha belirgin ve şiddetlidir. Tuz içeren hava da iyi korunmayan makine parçalarında korozyona neden olabilmektedir [19].

Ayrıca sistemdeki yoğuşma yardımcı sistemlerde ve yakıt nozullarında korozyona neden olabilmektedir. Kompresör girişinde CO₂ içeriğinin fazla olması da metal yüzeylerde CO₂ kaynaklı korozyona yol açmaktadır.

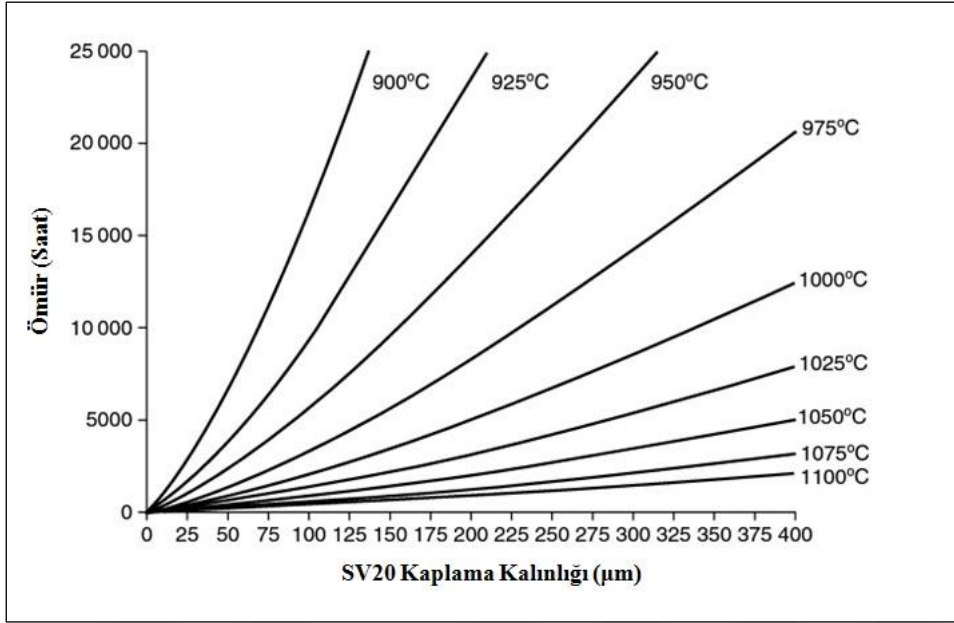
3.4. Oksidasyon

Bir metalin oksidasyonu, metalin nötr durumdan pozitif yüklü bir iyon haline gelmesine neden olan bir veya daha fazla elektron kaybıdır. Bu da yüzeyde metal oksit oluşumuyla sonuçlanır. Paslanma tipik bir oksidasyon sürecidir. Yüzeydeki oksit tabakası, metal üzerinde koruyucu bir bariyer (pasivasyon filmi olarak da adlandırılır) olarak faydalı olabileceği gibi, metalin mekanik özelliklerinde hızlı bir azalmaya yol açacak oranda devam ettiğinde zararlı olabilmektedir [19].

Oksidasyon, metal yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında ve metal yüzey ile sıcak gaz yolunda kalan oksijen arasında bir reaksiyon gerçekleştiğinde meydana gelir. Bu reaksiyon duvar kalınlığının azalmasına yol açar. Oksidasyonu azaltmak için genellikle kaplamalar uygulanır. Bu kaplamalar ana metalden daha yüksek oksidasyon sıcaklıklarına sahip olsa da, kaplama zamanla tükenir ve bu noktada ana metal oksidasyonu başlar. Şekil 3.4'te örnek bir SV 20 kaplamasına ait kaplama kalınlığı, sıcaklık ve ömür grafiği verilmiştir. Oksidasyonun önemli bir sorun olduğu en tipik bölgeler metal sıcaklığını yeterince düşürmek için aşırı miktarda soğutma havasının gerekli olabileceği kaplamasız kanatların uçlarıdır. Gaz türbini sıcak yüzeylerinde yeterince soğutma yapılamayan bölgeler oksidasyon için en elverişli alanlardır [20].

Günümüzün gelişmiş gaz türbin sistemlerinde oksidasyon sadece kanat dış yüzeyleri için değil, aynı zamanda soğutma havasının yüksek sıcaklığı ve kompresördeki yüksek basınç oranı nedeniyle soğutma delikleri gibi iç geçişler için de sorun oluşturmaktadır.

Platin içeren yeni alüminyum alaşımlı kaplamalar oksidasyon direncinin yanı sıra korozyon direncini de arttırmaktadır. Bazı büyük üreticiler korozyona karşı korumaya dayalı kaplamalardan daha yüksek metal sıcaklıklarında oksidasyona dayanıklı kaplamalara doğru geçiş yapmaktadırlar. Termal bariyer kaplamalar (TBC) tüm ileri teknoloji ünitelerinde ilk birkaç kademedeki kullanılmaktadır. İç yüzeylerin oksidasyonuna neden olan kompresör çıkışının yüksek sıcaklığı nedeniyle iç kaplamaların kullanımı popüler hale gelmektedir. Bu kaplamaların büyük bir kısmı alüminyum alaşımlı kaplamalardır [1].



Şekil 3.4. SV20 yüzey kaplamasının oksidasyon grafiği [20]

3.5. Sıcak Korozyon

Yüksek sıcaklık korozyonu olarak da adlandırılan sıcak korozyon, metal yüzeyinin yüksek sıcaklıklarda başka bir kimyasal madde ile etkileşimi sonucu ortaya çıkar. Sıcak korozyon, bir bileşen ile yüzeyinde biriken erimiş tuzlar arasındaki kimyasal reaksiyon tarafından üretilen hızlandırılmış bir oksidasyon şeklidir. Sıcak korozyon karmaşık bir dizi kimyasal reaksiyondan oluşur. Tuzların (Na_2SO_4) yüzeyde birikmesi sonucu alaşımların hızlandırılmış oksidasyonudur. Tip I veya yüksek sıcaklık korozyonu, 730 ila 950 °C sıcaklık aralığında meydana gelir. Tip II veya düşük sıcaklık korozyonu ise 550 ila 730 °C sıcaklık aralığında meydana gelir. Gaz türbinlerinde sülfatlaşma ve vanadyum destekli sıcak korozyon, metalin beklenenden daha erken bozulmasının ve kırılmasının en önemli nedenidir. Örneğin, türbin kanatlarında sıcak korozyondan dolayı kanat metal yüzeyinin sürekli incilmesi ve ardından mekanik gerilimler altında yüzey altı çatlaklarının büyümesi olan sıcak gerilimli korozyon çatlama, birçok uçak ve kara tabanlı gaz türbinleri arızalarının temel nedeni olarak kabul edilmektedir [19].

Sıcak korozyon, aynı zamanda kirlenmiş çalışma ortamlarında oksidasyon ve sülfatlaşmanın bir kombinasyonu ile meydana gelen ve büyük ölçüde hızlandırılmış bir çevresel etki biçimidir. Sıcak korozyona yol açan en yaygın kirleticiler sodyum ve sülfürdür. Ancak potasyum, vanadyum, kurşun ve molibden gibi diğer metalik kirlilikler de hızlandırılmış korozyona yol açabilmektedir. Tip 1 ve Tip 2 olarak adlandırılan her iki durumda da metal

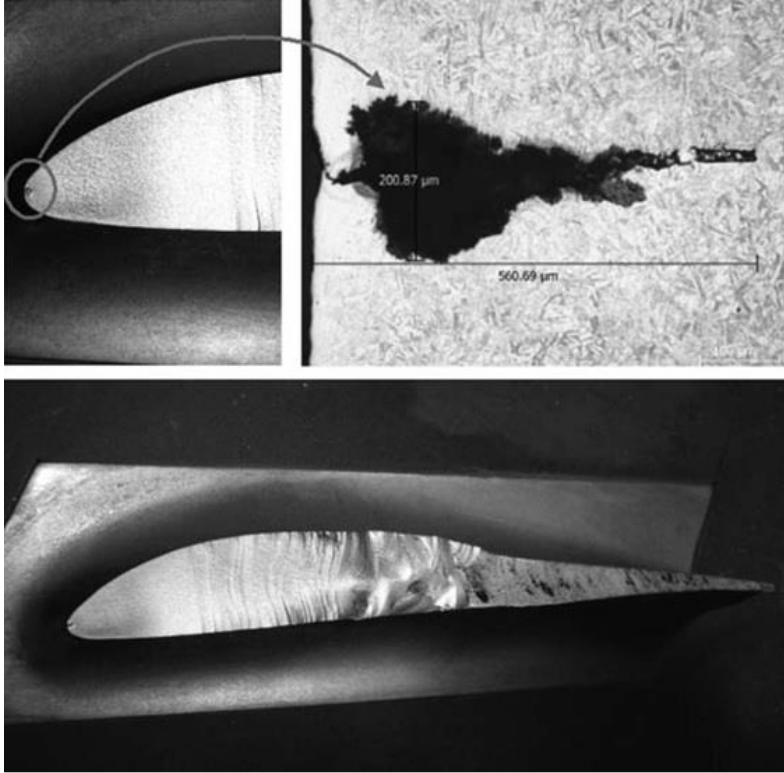
yüzeylerdeki koruyucu oksit tabakası bir akış reaksiyonu ile eriyerek büyük ölçüde hızlandırılmış oksidasyon ve sülfatlaşma meydana gelmektedir. Gaz türbini kanatları, genellikle oksidasyon ve sıcak korozyon direncini artırmak için MCrAlY yüzey kaplaması veya difüzyon kaplamaları (sade alüminit veya platin alüminit) ile kaplanır [9].

3.6. Sülfatlaşma (Sülfidasyon)

Sülfatlaşma, bir metal ile kükürt ve oksijen içeren bir atmosfer arasında sülfatlar ve/veya oksitler oluşturan bir reaksiyondur. Sülfatlaşmanın meydana gelmesi için sadece yanma havasında veya yakıtta kükürt bulunması yeterlidir. Sodyum veya potasyum bulunmasına gerek yoktur. Esas itibariyle, sülfidasyon saldırısı, korozyon korumasının kaybı nedeniyle alt tabaka malzemesinin hızlı bir şekilde bozulmasına neden olan hızlandırılmış bir oksidasyon şeklidir. Oksidasyon sırasında koruyucu oksit pulları oluşabilirken, oluşan metalik sülfürler koruyucu değildir. Bu durum, sülfidasyon saldırısı tarafından üretilen hızlı bozulma sürecini açıklamaktadır [21].

3.7. Çukurcuk ve Aralık Korozyonu

Çukurcuk korozyonu, metal yüzeyde küçük ancak derin deliklerin oluşmasına yol açan bölgesel bir korozyon mekanizmasıdır. Metal parçanın geri kalanı tamamen temiz, parlak ve cilalı görünebileceğinden, bu delikler genellikle tespit edilemez ve beklenmedik arızalar için önemli bir tehlike oluşturur. Çukurlaşma genellikle gaz türbini kompresör kanatlarında görülür ve tuzlu su gibi iletken kirliliklerin metal yüzeydeki küçük yüzey çatlaklarına girmesinden kaynaklanır. Su buharlaştıkça, kirliliğin (genellikle sodyum, sülfat veya klorür) konsantrasyonu artar, bu da oldukça lokalize korozyona ve bunun sonucunda çatlakların derinleşmesine neden olur. Bu süreç derin bir çatlak oluşana, metal parçalar kopana ve bir çukur (veya delik) oluşana kadar devam eder. Bu çukur, kanadı ciddi şekilde zayıflatarak gerilim yoğunlaşmalarına neden olabilmektedir. Çukurlaşma, genellikle görsel olarak tespit edilemeyen çok küçük mikroskobik yüzey kusurları veya çizikler tarafından başlatılmaktadır. Kompresör kanatlarında çukurlaşma, çoğunlukla kompresöre giriş havasından tuzun girdiği gaz türbini uygulamalarında ve ünitenin çok sayıda başlatma ve durdurma ile yüksek oranda döngüsel çalışması durumunda meydana gelmektedir [19].



Resim 3.1. Kompresör kanadı ucundaki çukurcuk korozyonu ve kanada verdiği hasar [10]

Resim 3.1’de bir kompresör kanadı üzerindeki çukurcuk korozyonunun tipik bir örneği ve bunun olası sonuçları verilmiştir. Tek bir kanadın ön kenarında, inceleme sırasında bile fark edilmesi zor olan küçük bir çukur oluşmuştur. Bu küçük çukur daha büyük bir boyuta ulaştığında mekanik mukavemeti etkilemektedir. Daha sonra kanat, mekanik aşırı yük nedeniyle tüm uzunluğu boyunca çoğunlukla başlatma/durdurma döngüleri sırasında yavaşça çatlamaya başlamaktadır [10].

Kompresör kanatlarındaki çukurcuk korozyonunu sınırlandırmak için korozyon önleyici kanat kaplamaları kullanılmaktadır. Ayrıca kompresörler herhangi bir uzun süreli kapatma döneminden önce iyice suyla yıkanmalıdır (tuz birikintilerini gidermek için) ve giriş filtreleme sistemi tuz girişini en aza indirecek şekilde tasarlanmalıdır [19].

Aralık korozyonunun fiziksel süreci çukurcuk korozyonuna benzemektedir. Ancak aralık korozyonu parçalar arasındaki temas alanları, sızdırmazlık elemanları ve contaların altında veya kanat aralıklarındaki sertleşmiş kalıntı kirlilikler gibi boşluklarda meydana gelir. Bu aralıklardaki kirliliklerin konsantrasyonu çok yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Bu aralıklar parçalar sökülmeden kolayca kontrol edilemediğinden, aralık korozyonu önemli bir arıza riski oluşturmaktadır. Gaz türbinlerinde, rotor kanat tabanı ve disk yuvaları arasındaki

yüksek gerilimli birleşme yüzeylerindeki aralık korozyonu, kanatlar sökülene (gaz türbini onarılmadıkça/revizyona alınmadıkça genellikle yapılmaz) veya kanat bağlantısı kırılarak sıcak gaz yoluna zarar verene kadar yıllarca fark edilmeyebilmektedir [19].

3.8. Erozyon (Partiküle Bağlı Aşınma)

Erozyon, kanat malzemesinin genellikle çapı 5-10 mikrondan büyük olan kum ve uçucu kül gibi sert parçacıklar tarafından aşındırılarak uzaklaştırılmasıdır. Erozyon, kanat aerodinamik performansını ve mekanik mukavemetini olumsuz etkiler. Erozyonun ilk etkisi yüzey pürüzlülüğünde artış ve kompresör verimliliğinde düşüştür. İlerledikçe kanat ön ve arka kenarlarda ve kanat ucunda kanat profili kontur değişiklikleri meydana gelir. Kanadın çıkış kenarının incilmesi yorulma mukavemetine zarar verir ve kanat arızasına neden olur. Kanat ucu mukavemetindeki önemli bir kayıp kompresörde basınç dalgalanmasına neden olabilmektedir. Bir rotor kanadı için en yaygın metal kaybı uçta olurken, bir stator için bu alan köke yakındır. Tipik olarak, aşındırıcı partiküller kompresörün dış çapına kadar santrifüjlenir. Genel bir kural olarak, kesit alanı kaybı %10-15'i aştığında kanat değişimi dikkate alınmalıdır [6].

Endüstriyel uygulamalar için kullanılan son teknoloji filtreleme sistemleri büyük partiküllerin sisteme girişini büyük oranda engellediğinden erozyon daha çok uçak motorları için bir sorun teşkil etmektedir. Fakat endüstriyel uygulamaların bulunduğu dış ortam koşullarının da, özellikle kum fırtınaları veya uçucu küllerin fazlalığında, erozyon için uygun ortam oluşturacağını da dikkate almak gerekmektedir.

Havaya veya yakıtı karışan aşındırıcı partiküller türbin kesiti gibi sıcak bölümlerde de erozyona neden olabilmektedir. Özellikle erozyon nedeniyle soğutma deliklerinde tıkanma meydana geldiğinde, bu durum kanatların aşırı ısınmasına ve nihayetinde sürünme kopmasına yol açabilmektedir. Kanat kesit boyutunun azalması da gerilme sorununu daha da artırmaktadır. Yakıttaki aşındırıcı partiküller ise nozül aşınmasına yol açarak sıcaklık profilinin bozulmasına ve türbin girişinde aşırı sıcak noktaların oluşmasına neden olabilmektedir [6].

Partikül erozyonunun yanı sıra, bölgesel aşırı ısınma ve zaman zaman meydana gelen soğutma kaybı veya kaplamadaki bir hasar nedeniyle ısıl döngüden kaynaklanan sıcak gaz erozyonu durumu da bulunmaktadır. Birkaç döngü sonucunda hasar meydana gelmekte ve

artan pürüzlülük (erozyon) durumu daha da kötüleştirmektedir. Bu sorun platformlardaki ilk kademe kanat segmentlerinde meydana gelebilmektedir. Tipik olarak en ciddi şekilde etkilenen parçalar sıcak gaz yolunda olanlardır [6].

3.9. Abrasyon (Sürtünmeye Bağlı Aşınma)

Abrasyon, dönen bir yüzey sabit bir yüzeye sürtündüğünde meydana gelir. Birçok makinede, uygun boşlukları oluşturmak için makinenin alıştırılması sırasında belirli bir miktar sürtünmeye izin verilen aşınabilir yüzeyler kullanılır. Malzemenin kaldırılması tipik olarak sızdırmazlık veya uç boşluklarını artıracaktır. Bu etkilerden bazıları makinenin temizlenmesi veya yıkanmasıyla tersine çevrilebilirken, diğerleri bileşenlerin düzeltilmesini, onarılmasını veya değiştirilmesini gerektirir. Bu nedenle, geri döndürülebilir ve döndürülemez degradasyon arasında ayırım yapmak oldukça yaygın bir uygulamadır. Devrede ve devre dışı suyla yıkama ile tersine çevrilebilen tüm degradasyon mekanizmaları geri döndürülebilir degradasyon olarak kabul edilir. Parçaların değiştirilmesini gerektiren degradasyon mekanizmaları, genellikle bir makine revizyonu ve bakımı gerektirdiğinden, geri döndürülemez olarak kabul edilir. Bazı degradasyon etkileri kontrol sistemi düzenlemeleriyle geri döndürülebilir ancak kütleli debi ve performansı ölçmek için sınırlı yetenekler nedeniyle sahada gerçekleştirilmesi zordur. Bu konuda araştırma yapanların hem fikir olmadığı bir başka alan da bakım ve revizyon sırasında performansın geri kazanılmasıyla ilgilidir. Birçok üretici yeni makinelerle aynı performans özelliklerine sahip bakım ve revizyonlar sunarken, tam performans geri kazanımının imkansız olduğu bazı durumlar vardır [13]. Sahadaki performans düşüşünün tam miktarının belirlenmesinin oldukça zor olduğu unutulmamalıdır. Özellikle kalibre edilmiş bir test tesisi yerine paket enstrümantasyon kullanılıyorsa, test belirsizlikleri önemli hale gelmektedir. Trendler bile bazı belirsizlikler içerir, çünkü her durumda makine performansının referans koşullara göre düzeltilmesi gerekmektedir [22].

3.10. Parçacık Füzyonu

Parçacıkların sıcak yüzeylerdeki füzyonu da bozulmaya yol açmaktadır. Kuru haldeyken, 2 ila 10 µm boyutundaki parçacıklar eski tip türbinlerden geçerek hiç veya çok az hasara yol açabilmektedir. Ancak, bu partiküller yeni nesil, daha yüksek yanma sıcaklıklarında çalışan türbinlerde sorunlara neden olabilmektedir. Parçacıkların füzyon sıcaklığı türbin çalışma sıcaklığından düşükse, parçacıklar eriyerek sıcak metal yüzeylere yapışmaktadır. Bu durum

sonucunda ortaya çıkan erimiş kütleler soğutma kanallarını da tıkayabilmektedir. Ayrıca yüzey profilini değiştirerek ısı transferini ciddi şekilde engellemekte ve genellikle termal yorgunluğa yol açabilmektedir. Etkilenen yüzeyler genellikle kalıcı olarak hasar görmekte ve bunun sonucunda parçaların değiştirilmeleri gerekmektedir [21].

3.11. Mekanik Bozulma

Mekanik bozulmanın başlıca nedenleri arasında yataklarda ve sızdırmazlık elemanlarında aşınma, kaplin sorunları, aşırı gürültü ve titreşim ile yağlama sistemindeki sorunlar yer almaktadır. Mekanik bozulmanın en önemli göstergesi titreşimdir. Titreşim olarak kendini gösteren birçok problemin aslında aerodinamik veya performans ile ilgili temel nedenleri olabileceğine dikkat etmek gerekmektedir. Yanma odası yakıt nozulları zaman zaman tıkanabilmektedir. Bunun koklaşma, erozyon ve yanlış montaj gibi çeşitli nedenleri olabilmektedir. Sıcaklık deformasyonları sıcak bölümlerde bir dizi sorun yaratabilmektedir. Kanat üzerinde dinamik aşırı yükler oluşturmakta ve muhtemelen yorulma sorunlarına neden olmaktadır [23].

4. GAZ TÜRİNİ BAKIMLARI

Bakım, bir tesis içindeki en önemli işlemlerden biridir. Gaz türbinlerinin üretimi ve bakımı tamamen farklı disiplinlere sahiptir. Üretim süreci parçaların belirli toleranslara uygun olarak şekillendirilmesi ve montajını içerirken, bakım süreci ise bu toleransların ve sağlanması gereken asgari performansa en yakın değerlerin, belirli bir plan çerçevesinde uygulanan işlemler yoluyla yeniden elde edilmesini içermektedir.

Bakıma ilişkin plan ve prosedürler her zaman tartışmalıdır çünkü; bakımın tanımı ve içeriği her bakım sorumlusunun bireysel yorumuna göre değişir. Bakımın kapsamı, sıkı bir planlama ve uygulama, inceleme ve revizyon, bütünsel raporlar ve maliyet hesaplamalarını içermektedir.

Bakım maliyetleri, gaz türbinlerinin işletme koşullarının kalitesine bağlı olarak minimize edilebilmektedir. Bunun yanında sistemdeki her bir ekipmanın planlı bir bakım programı altında çalıştırılması etkin bir şekilde takip edilerek, izlendiğinde daha kesintisiz işletme ve uzun vadeli ömür elde edilebilmektedir. Ekipmanın yanlış işletilmesi ise öngörülen işletme süresinden çok daha kısa sürede bozulmalara ve sistemin devre dışı kalmasına neden olabilmektedir. Dolayısıyla, işletme ve bakım birbirine bağlı fakat ayrı birer uzmanlık ve tecrübe isteyen farklı disiplinlerdir.

Önleyici bakım ve toplam kalite kontrol uygulamaları ile toplam çalışan katılımının birleştirilmesi, ekipman bakımı için verimliliği artıran, arızaları ortadan kaldıran ve günlük faaliyetler yoluyla operatörün kendi kendine bakım yapmasını teşvik eden yenilikçi bir sistem ortaya çıkarmaktadır. Toplam üretken bakım (TPM) olarak bilinen bu kavram Seiichi Nakajima tarafından ortaya atılmıştır. Gelişen teknolojik altyapı ve enerji üretim sistemleri ekipmanının seçimi için yeni bir anlayış olan “Yaşam döngüsü maliyeti” (LCC) temelinde yeni bir bakım sistemi uygulamaya konulmuştur. Özellikle büyük enerji santralleri için bu yeni sistem, toplam durum izleme ve toplam üretken bakımın bakım ilkelerinin birleşimine dayanmaktadır ve “Performansa dayalı toplam üretken bakım sistemi” (PTPM) olarak adlandırılmaktadır [1].

Genel bakım sistemi bölümlere ayrılmıştır ve birçok farklı bakım kavramına dayanmaktadır. Aşağıda büyük enerji santralleri, petro-kimya tesisleri ve diğer proses tipi endüstriler için geliştirilmiş ve mükemmel bakım sistemine ulaşmayı hedefleyen beş temel bakım prensibi yer almaktadır [1]:

1. Arızalara dayalı panik bakım
2. Önleyici bakım
3. Performans bazlı bakım
4. Performans üretken bakım
5. Performansa dayalı toplam üretken bakım (PTPM)

Arızalara dayalı panik bakım prensibinde, belirgin sorunlar ortaya çıktığında hasarlı ekipmanın onarılması veya değiştirilmesi yer almaktadır. Bu tür sorunlara hızlı bir şekilde müdahale edebilmek için sahada büyük bir yedek parça stoku bulundurmak gerekmektedir. Stok maliyeti oldukça pahalı olduğundan düşük kaliteli parçalar satın alarak ve düşük ücretli işgücü çalıştırarak dengelemenin sağlanması istenmektedir ve sonuçta yapılan hizmetin kalitesi de düşük olmaktadır. Bu durumda, santralin her an devre dışı kalma olasılığı yüksektir. Santral devre dışı kaldığında üretim kaybı sonucu ortaya çıkan maliyet ve yedek parça stok malzeme maliyeti oldukça yüksektir [1].

Önleyici bakım prensibinde, bakım faaliyetlerinin belirli bir plan ve program çerçevesinde yürütülmesi gerekmektedir. Bakım faaliyetleri arasındaki sürelerin ve parça değişim zamanlarının çok iyi kontrol edilmesi gerekmektedir. Bakım veya değişim işlemleri parçaların çalışma saatleri iyi durumdayken ve çok erken yapılırsa gereksiz yere üretimin durmasına, işletme ve bakım maliyetlerinin artmasına sebebiyet vermektedir. Bunun yanında, bakım veya değişim işlemleri parça çalışma saatleri dolmasına rağmen yapılmazsa bu durum önceden tespit edilemeyen büyük arızalara neden olabilmektedir [1].

Performansa dayalı toplam üretken bakım, ekipman etkinliğini, verimliliğini ve bakım aralıkları arasındaki süreyi maksimize etmeyi amaçlar. Ekipmanın tüm ömrü boyunca kapsamlı bir bakım sistemi kurarak üst düzey yönetimden en alttaki işçilere kadar her bir çalışanı içerir. Mühendislik, bakım, işletme gibi tüm departmanlardaki çalışanlar üst yönetimin motivasyonu ile birlikte sistemin en iyi şekilde çalışması için görev alırlar. Buradaki “toplam” kelimesinin anlamı; maksimum tesis verimliliğini ve minimum işlem dışı

kalma süresini, ekonomik verimlilik veya karlılığı, önleyici bakım prensibindeki gibi bakım önleme ve sürdürülebilirlik iyileştirilmelerini içerir. Ayrıca tüm çalışanların tam katılımını ve operatörlerin küçük grup faaliyetleri aracılığıyla otonom bakımını içeren bütünsel bir bakım sistemini işaret eder [1].

Çizelge 4.1’de, Performansa dayalı toplam üretken bakım, üretken bakım ve önleyici bakım prensipleri arasındaki ilişkiler yer almaktadır.

Çizelge 4.1. Bakım prensipleri arasındaki ilişkiler [1]

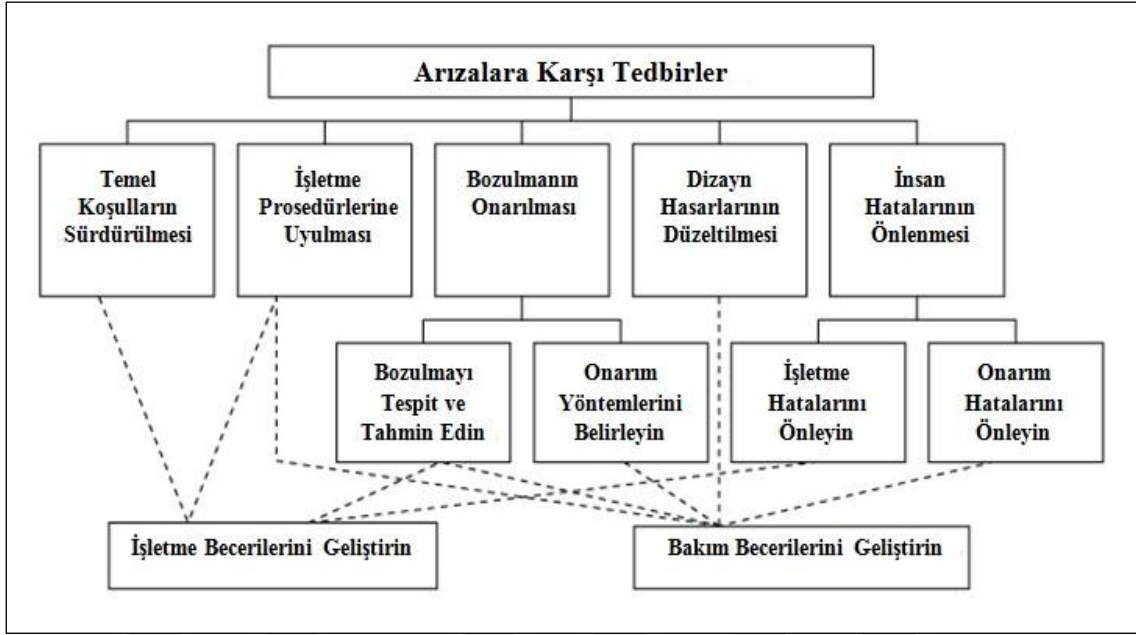
Avantajlar	Performansa Dayalı Toplam Üretken Bakım	Performans Üretken Bakım	Performansa Dayalı Bakım	Önleyici Bakım	Panik Bakım
Ekonomik verimlilik	Evet	Evet	Evet	Evet	Hayır
Ekonomik ve zaman verimliliği	Evet	Evet	Evet	Hayır	Hayır
Toplam sistem verimliliği	Evet	Evet	Hayır	Hayır	Hayır
Operatörler tarafından otonom bakım	Evet	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır

İyi bir bakım programının hedefi sıfır arızadır. Bu hedefe ulaşmak için beş karşı tedbir bulunmaktadır [1].

Bunlar aşağıda listelenmiştir:

1. İyi düzenlenmiş temel koşulların sürdürülmesi (temizlik, yağlama ve civatalama).
2. Uygun işletim prosedürlerine uyulması.
3. Toplam durum izleme (performans, mekanik ve teşhis tabanlı).
4. Tasarımdaki zayıflıkların iyileştirilmesi.
5. İşletme ve bakım becerilerinin geliştirilmesi.

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere bir gaz türbini santralinde, enerji üretim tesisinde veya herhangi bir proses tesisinde üretim süreçlerinin kesintiye uğramadan sürdürülebilir bir şekilde devam etmesi için arızalara karşı tedbirler almak gerekmektedir.



Şekil 4.1. Arızalara karşı tedbirler [1]

Her ne kadar gelişen teknolojiyle birlikte otonom sistemlerin yoğunluğu artsa da bu tür tesislerde işletme ve bakım personelinin bilgi ve tecrübeleri ile becerilerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu nedenle; işletme ve bakım personelinin periyodik olarak eğitilmesi gerekmektedir. Bunun yanında, tesisin güvenle çalışabilmesi, emre amadeliğinin korunabilmesi için acil durumlarda müdahalede bulunacak ve ortaya çıkan arızayı giderebilecek düzeyde alet, ekipman ve yedek malzeme tesiste bulunmalıdır. Tesisin işletilmesi sırasında sürekli bir durum tespit ve izleme sistemi ile gelişebilecek arızalara karşı hazırlıklı olmak gerekmektedir. Kontrol ve izleme sistemlerinin yanı sıra işletme ve bakım personelinin durum tespiti ve değerlendirme yeteneği de bazı durumlarda hayati derecede önem arz etmektedir. Ayrıca tüm bu süreçlerin basit ve anlaşılır bir dille dokümente edilmiş plan ve prosedürlerle yürütülmesi, kontrol çizelgelerinin oluşturulması ve kayıt defterlerine işlenerek periyodik olarak raporlanması tesisin sürdürülebilir bir şekilde işletilmesi, geçmişe dönük olayların kaydedilmesi ve emre amadeliğinin korunması için çok önemlidir.

4.1. Emre Amadelik ve Güvenilirlik

Bir gaz türbininin emre amadeligi, gaz türbininin herhangi bir dönemde, ihtiyaç olsun veya olmasın kurulu gücünde elektrik üretmeye hazır olduğu zamanın yüzdesidir. Gaz türbininin kurulu gücü, tesisin kabulü için yapılan performans testleri sonucunda belirlenen tasarım veya referans koşullarında gaz türbininin net elektrik enerjisi üretim kapasitesidir [1].

Emre amadelik faktörü (AF), [24] standardında aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$AF = 1 - \frac{FOH+POH}{PH} = \frac{AH}{PH} = 1 - \frac{UH}{PH} \quad (4.1)$$

Denklemden FOH: Zorunlu kesinti saatleri, POH: Planlı kesinti saatleri, AH: Kullanılabilir saatleri, UH: Kullanım dışı saatleri, PH: Toplam dönem saatlerini ifade etmektedir.

Güvenilirlik ise; gaz türbininin talep edilen güçte belirli bir süre boyunca hedeflenen ve yeterli şekilde tanımlanmış bir ortamda arıza olmadan çalışma olasılığı olarak tanımlanır.

Güvenilirlik faktörü (RF) ise bir ünitenin, ana ekipmanın veya bileşenin ihtiyaç duyulduğu bir zamanda zorunlu kesinti durumunda olmama olasılığıdır. Aşağıdaki formül ile verilir [24]:

$$RF = 1 - \frac{FOH}{PH} = 1 - FOF \quad (4.2)$$

Denklemden FOH: Zorunlu kesinti saatleri, PH: Toplam dönem saatleri, FOF: Zorunlu kesinti faktörünü ifade etmektedir.

Bir tesisin güvenilirliği yakıt türü, önleyici bakım programları, çalışma modu, kontrol sistemleri ve ateşleme sıcaklıkları gibi birçok parametreye bağlıdır. Bir gaz türbininde çok önemli bir diğer faktör de Başlatma güvenilirliğidir (SR). Bu güvenilirlik, gerçekleşen başarılı başlatmaların net bir şekilde anlaşılmasıdır ve aşağıdaki ilişki ile verilir [1]:

$$SR = \frac{\text{Başarılı başlatma sayısı}}{(\text{Başarılı başlatma sayısı} + \text{Başlangıç başarısızlıklarının sayısı})} \quad (4.3)$$

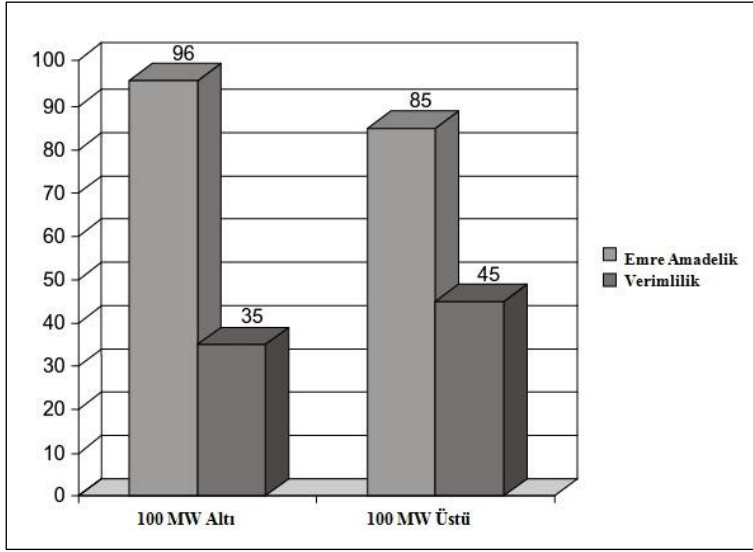
Sigorta sektörü ekipman arızası riskleriyle ilgilenmektedir. Gelişmiş gaz türbinleri için arızaların sıklığı ve şiddeti büyük endişe kaynağıdır. Ancak mühendislik açısından risk şu şekilde daha iyi tanımlanır [1]:

$$\text{Risk} = \text{Arıza olasılığı} \times \text{Arızanın sonuçları} \quad (4.4)$$

Arızanın sonuçları arasında onarım/değiştirme maliyetleri ve arızanın giderilmesi için geçen kesinti süresinden kaynaklanan gelir kaybı yer almaktadır. Arıza olasılığını ve/veya sonuçlarını azaltan eylemler riski azaltma ve genellikle sigortalanabilirliği artırma eğilimindedir.

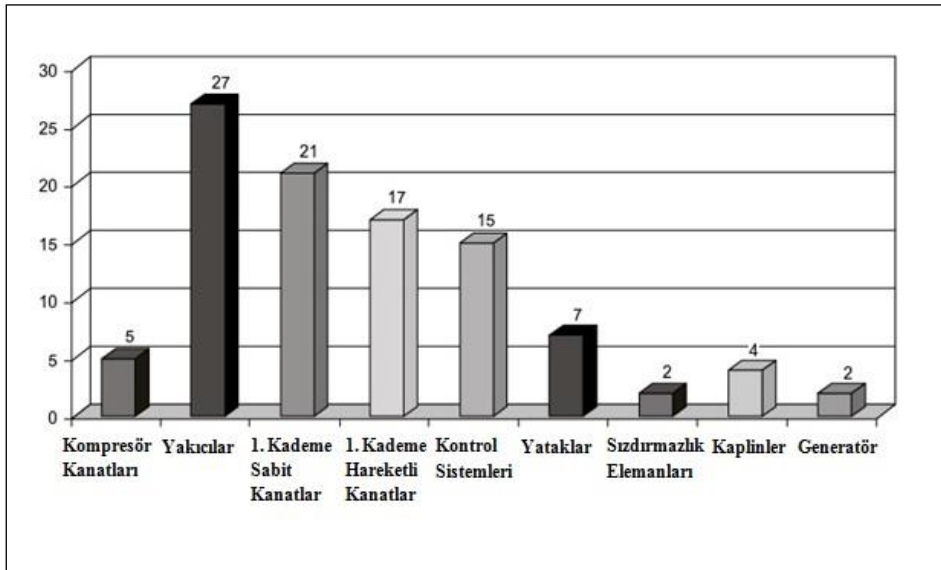
Yeni teknolojiye sahip gaz türbinlerinde 100 MW'ın altındaki üniteler için emre amadelik faktörü %94-97 arasındayken, 100 MW'ın üzerindeki daha büyük üniteler %85-89 emre amadelik faktörüne sahiptir. Daha büyük üniteler iki kat daha fazla üretim yapmaktadır, ancak emre amadelik faktörü %95'ten %85'e düşmüştür. Tüm üreticiler için 7-10 puanlık bir düşüş söz konusudur. Bu düşüşün bir kısmı daha büyük makinelerin tamirinin daha fazla zaman almasıyla ilgili olabilmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklık ve basınçtan da kaynaklanmaktadır. Daha yüksek türbin giriş sıcaklığı ve daha yüksek basınç oranı ile birlikte ünite boyutu ve karmaşıklığındaki artış genel gaz türbini verimliliğinde bir artışa yol açmıştır. Verimlilikteki %7-10'luk artış birçok durumda Şekil 4.2'de görüldüğü gibi aynı miktarda veya daha fazla emre amadelik düşüşüne yol açmıştır. 100 MW'lık bir tesiste emre amadelikteki %1'lik bir düşüş yılda 500 000 \$ gelire mal olabilir, dolayısıyla birçok durumda verimlilikteki kazanımları dengelemektedir. Bir tesisin güvenilirliği yakıt türü, önleyici bakım programları, çalışma modu, kontrol sistemleri ve ateşleme sıcaklıkları gibi birçok parametreye bağlı olmaktadır [1].

Ünitelerin düşük güvenilirliği yüksek bakım maliyetlerine yol açar. Düşük güvenilirlik genellikle yüksek bakım maliyetlerinden daha büyük bir ekonomik faktördür. Birçok büyük enerji santrali, rafineri ve petrokimya tesisinde arızaların yaklaşık üçte biri makine arızalarından kaynaklanmaktadır; bu nedenle güvenilirliği artırmak için bir makinenin parçalarını iyi tasarlamak gerekmektedir.



Şekil 4.2. Emre amadelik-verimlilik karşılaştırma grafiği [1]

Gaz türbinlerini komple bir sistem olarak düşündüğümüzde, içerisinde birçok farklı ekipman ve sistem bulundurmaktadır. Bu bileşenlerin çalışma koşullarına bağlı olarak sistemin genelini etkileyebilecek ve ünitenin devre dışı kalmasını sağlayabilecek nitelikte kısıtları bulunmaktadır. Günümüze kadar gelen birçok farklı tasarım ve uygulama metodu olmasına rağmen genel olarak oluşturulan istatistiklere göre Şekil 4.3'teki grafikten de görüleceği üzere yakıcılar, 1. kademe sabit ve hareketli kanatlar ile kontrol sistemleri gaz türbinlerinin duruş sürelerinin artmasına en çok etki eden ana bileşenlerdir.



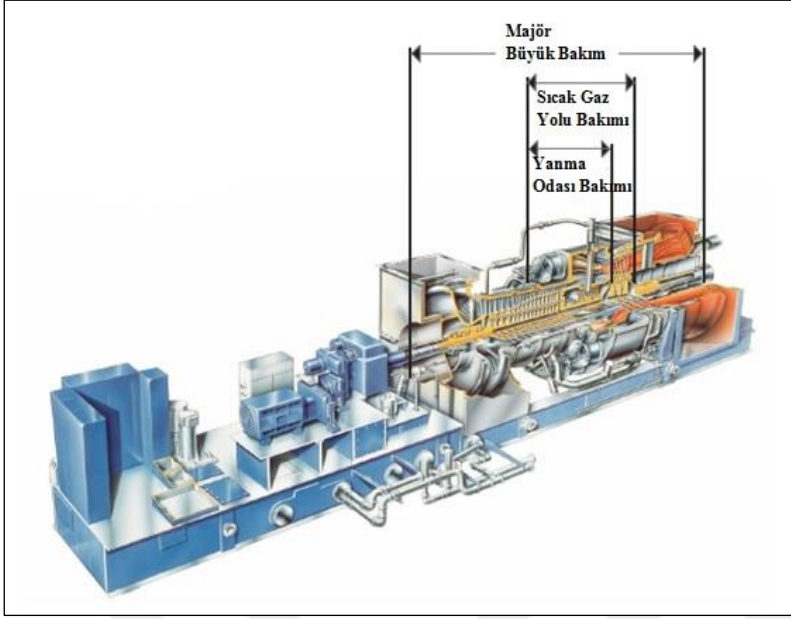
Şekil 4.3. Gaz türbini bileşenlerinin duruş süresine katkıları [1]

4.2. Gaz Türbini Muayene ve Bakım Tipleri

Gaz türbinleri, optimum emre amadelik ve güvenilirlik elde etmek için uygun periyodik bakım, onarım ve parça değişimi gerektirmektedir. Gaz türbinlerinin bakım ve onarım gereksinimleri, çok küçük işlerle başlayıp büyük bir revizyona kadar artan ve ardından döngüyü tekrarlayan bir bakım modeli oluşturmaya elverişlidir. Bu bakımlar, maksimum emre amadelik ve güvenilirliği korurken ünite devre dışı kalmalarını ve bakım maliyetlerini azaltmak için optimize edilebilmektedir. Bakımlar, operasyonel ve devreden çıkarılmış olarak sınıflandırılabilir. Operasyonel bakımlar ekipmanın genel durumunun göstergesi olarak ve demonte bakım programının planlanmasında kılavuz olarak kullanılır. Bu bakımlar hazırda bekleyen (stand-by), çalışan, yanma odası, sıcak gaz yolu ve majör büyük bakım olarak tanımlanabilmektedir [25].

Gaz türbini ünitelerinde sistem devre dışı bırakılarak yapılan üç çeşit bakım aralığı vardır: Bunlar yanma odası, sıcak gaz yolu ve majör bakımlardır. Sıcak gaz yolu bakımı yakıcı ve türbin muayenelerini içerir. Majör (büyük) bakım, sıcak gaz yolu ve kompresör muayenelerini içerir. Ayrıca birçok durumda majör bakımlar rotoru da kapsamaktadır, çünkü türbinin komple bakımı için çoğu zaman rotorun çıkarılması gerekmektedir.

DLN (kuru düşük azot) yakıcılara sahip ileri seviye gaz türbinleri nadiren sıvı yakıt yakar (acil durumlarda yedek yakıt olarak) ve NO_x kontrolü için seyreltici enjeksiyonu (buhar veya su) yoktur. Bu nedenle, standart muayene aralıkları öncelikle çalıştırma sayısı, hatalar, yük reddetme ve pik yakıtlı çalışma süresinden etkilenir. Ayrıca iki yakıtlı gaz türbinlerinde bakım kapsamında fuel-oil sisteminin de incelenmesi gerekmektedir. Bu durumda, yakıt nozülü tertibatları sökülerek temizlenir ve kontrolleri yapılır. Yakıt nozüllerinin temiz, kalıntı ve sızıntılardan arınmış olduğu ve yanma sepetlerinin temiz olduğunu doğrulamak için nozül açıklıklarından yanma odalarının ve geçiş parçalarının iç yüzeylerinin kontrol edilmesi gerekmektedir [26]. Şekil 4.4'te bir örnek gaz türbini ünitesinde sistem devre dışı bırakılarak yapılan bakımların kapsamaları belirtilmiştir.



Şekil 4.4. Bir gaz türbini ünitesindeki bakım kapsamaları [27]

4.2.1. Hazırda bekleme (stand-by) bakımı

Bekleme durumundaki bakımlar özellikle aralıklı hizmette kullanılan gaz türbinleriyle ilgilidir. Başlatma güvenilirliği (SR) birincil öneme sahiptir. Bu bakım, akü sisteminin rutin bakımını, filtre değişimini, yağ ve su seviyelerinin kontrolünü, rölelerin temizlenmesini ve cihaz kalibrasyonlarının kontrolünü içermektedir. Bu bakım tipi, türbinin emre amadeliğini kesintiye uğratmadan enerji talebinin yoğun olmadığı dönemlerde gerçekleştirilebilir. Periyodik test çalışması, stand-by bakımının önemli bir parçasıdır [25].

Gaz türbin santrallerinde “İşletme ve bakım kılavuzları” periyodik muayeneleri gerçekleştirmek için gerekli bilgi ve çizimleri içermektedir. Bu kılavuz kitaplarda kontrol talimatları, boru bağlantı planları ve elektrik şemaları yer almaktadır. Tüm kontrol cihazlarının kalibrasyonları, çalışma limitleri, çalışma özellikleri ve sıralamalarını içermektedir. Bu bilgiler işletme ve bakım personeli tarafından düzenli olarak kullanılmalıdır. Stand-by muayene ve bakımına dikkatle uyulması, genel bakım maliyetlerinin azaltılmasında ve yüksek türbin güvenilirliğinin sürdürülmesinde önemli bir etkiye sahip olabilmektedir. Sağlıklı bir bakım programı sağlamak için tüm kontrollerin ve bakım çalışmalarının iyi bir kaydının tutulması çok önemlidir [27].

4.2.2. Devrede muayene ve bakım

Devrede muayene ve bakım, ünitenin çalışır durumdaki genel ve sürekli gözlemlerden oluşmaktadır. Bu bakım tipi, yeni bir ünitenin çalıştırılması sırasında ve herhangi bir büyük demontaj çalışmasından sonra temel çalışma verilerinin oluşturulmasıyla başlar. Bu taban çizgisi daha sonra ünitedeki bozulmanın (degradasyon) ölçülebileceği bir referans görevi görür.

Normal ekipman başlangıç parametrelerinin yanı sıra temel kararlı durum çalışma parametrelerini belirlemek için veriler alınmalıdır. Kararlı durum, 15 dakikalık bir zaman diliminde 5 °F / 3 °C'den fazla bir değişikliğin meydana gelmediği koşullar olarak tanımlanır. Veriler düzenli aralıklarla alınmalı ve türbin performansının ve bakım gereksinimlerinin çalışma süresinin bir fonksiyonu olarak değerlendirilmesine izin verecek şekilde kaydedilmelidir.

Bu muayene ve bakım verileri şunları içerir:

Devir, yük, sıcak çalıştırma adetleri ve saatleri, yüke karşı egzoz sıcaklığı, titreşim seviyesi, yakıt debisi ve basıncı, yatak metal sıcaklığı, yağlama yağı basıncı, egzoz gazı sıcaklıkları, egzoz sıcaklığı yayılım değişiklikleri, başlatma süresi, durma süresi, generatöre ait yük, frekans, akım ve voltaj değerleri.

Bu liste yalnızca asgari bir listedir ve gerektiğinde diğer parametreler de kullanılmalıdır. Bu parametrelerin bir grafiği, sistemin koşullarını değerlendirmek için bir temel oluşturmaya yardımcı olacaktır. Normalden sapmalar, yaklaşan sorunları, kalibrasyondaki değişiklikleri veya hasarlı bileşenleri tespit etmeye yardımcı olmaktadır. Çalışma koşullarında ani anormal bir değişiklik veya ciddi bir hata durumu dahili bileşenlerde hasara işaret edebilmektedir. Türbin hasarına işaret edebilecek durumlar arasında yüksek titreşim, yüksek egzoz sıcaklığı dağılımları, kompresör dalgalanması, durum izleme sistemlerindeki anormal değişiklikler ve diğer izleme sistemlerindeki anormal değişiklikler yer almaktadır. Bileşen hasarından şüphelenildiğinde bu tür olaylardan sonra bir boroskop muayenesi yapılması önerilmektedir [27].

4.2.3. Yanma muayenesi ve bakımı (C tipi muayene ve bakım)

Yanma muayenesi ve bakımı yakıt nozüllerinin, yakıcı gömleklerinin, geçiş parçalarının, çapraz alev borularının ve tutucularının, buji tertibatlarının, alev dedektörlerinin ve yakıcı akış manşonlarının nispeten kısa bir demontaj muayenesidir. Yanma muayenesi ve bakımı, gaz türbini uygulamalarında C tipi (combustion type) muayene ve bakım olarak da adlandırılmaktadır. Bu muayene ve bakım işlemi iyi bir bakım programında ilk değiştirilmesi ve onarılması gerekenler olarak kabul edilen yakıcı gömlekleri, geçiş parçaları, yakıt nozülleri ve yakıcı başlıklarına odaklanır. Bu parçaların uygun şekilde incelenmesi, bakımı ve onarımı türbin sabit ve hareketli kanatları gibi sıcak gaz yolu parçalarının daha uzun ömürlü olmasına katkıda bulunacaktır.

Yakıcı gömlekleri, geçiş parçaları ve yakıt nozülü tertibatları sökülmeli ve arıza süresini azaltmak için yeni veya onarılmış bileşenlerle değiştirilmelidir. Sökülen gömlekler, geçiş parçaları ve yakıt nozülleri ünite tekrar çalıştırıldıktan sonra temizlenip onarılarak ve bir sonraki yanma muayenesi aralığında kullanılabilir.

Tipik yanma muayenesi ve bakımı kapsamında bir gaz türbininin düzenli bir şekilde kontrol edilmesi gereken farklı parçaları ve sistemleri bulunmaktadır. Bu kapsamda; çapraz alev boruları, tutma braketleri ve yanma gömleği gibi parçaların incelenmesi gerekmektedir. Yanma gömleği, termal bariyer kaplama (TBC) soyulmaları, aşınma ve çatlaklar açısından kontrol edilmelidir. Yakıt nozülleri, akış kovanı kaynakları, geçiş parçası ve sıkıştırma manşonları gibi diğer parçaların da çatlaklar, aşınma ve tıkanma açısından kontrol edilmesi önemlidir. Sarf malzemeleri ve contaların tamamının değiştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca türbin sabit kanat bölmeleri, kompresör, egzoz difüzörü, egzoz muhafazası ve yanma odasının gözle muayenesi ve doğru çalışıp çalışmadığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu incelemeler sıcak gaz yolu bakımı için program oluşturmada yardımcı olacaktır. B/E sınıfı gaz türbinlerinde radyal difüzör ve egzoz plenumunun içindeki yalıtımın da incelenmesi gerekmektedir. Son olarak, türbin giriş sistemleri, filtreler, evaporatif soğutucular ve susturucuların da incelenerek korozyon, çatlak ve gevşek parçalar açısından kontrol edilmesi gerekmektedir [27].

4.2.4. Sıcak gaz yolu muayenesi ve bakımı

Sıcak gaz yolu muayenesinin amacı, yanma işleminden çıkan sıcak gazlar nedeniyle yüksek sıcaklıklara maruz kalan parçaları incelemektir. Sıcak gaz yolu muayenesi, yanma muayenesinin tüm kapsamını ve ek olarak stator gövdesinin, türbin sabit ve hareketli kanatlarının ayrıntılı bir muayenesini içerir. Bu muayeneyi gerçekleştirmek için türbin muhafazasının üst yarısı çıkarılmalıdır. Muhafazanın çıkarılmasından önce, rotorun statora göre hizalanmasını sağlamak, yeterli boşlukları elde etmek ve stator muhafazasının bükülmesini önlemek için mekanik krikolar kullanılarak rotorun uygun bir şekilde merkez hattından desteklenmesi gereklidir [27].

Ayrıca bakım kapsamında sökülen parçaların amaçlanan ömürlerini karşılamalarını sağlamak için belirli bileşenlere özel muayene prosedürleri uygulanır. Bu muayeneler, bunlarla sınırlı olmamak üzere, boyutsal kontrolleri, florışıl penetrant muayenesini (FPI), Eddy current muayenesini (ECI) ve diğer tahribatsız test (NDT) yöntemlerini içermektedir. Sökülen parçalarda herhangi bir onarım işlemi yapılacaksa bu işlem ünitenin işletme geçmişi ve parça durumu temelinde gerçekleştirilir. Parçaların tam olarak onarımı için kaplamanın sıyırılması, kimyasal temizleme, HIP (sıcak izostatik işleme), ısıl işlem ve yeniden kaplama dahil (ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere) onarımlar da gerekli olabilmektedir. Gerekli olduğunda, gözle muayene ve NDT ile belirlendiği şekilde kaynak işlemi de uygulanabilecektir. Gerekli onarımların yapılmaması, parçanın çalışma ömrü tamamlanmadan hasar görmesine ve kullanım dışı kalmasına yol açabilecektir. Buna karşılık, gereksiz onarımlar zaman ve kaynakların gereksiz yere harcanmasına neden olmaktadır [27].

Gaz türbinlerinde sıcak gaz yolu parçalarından birinci kademe türbin hareketli ve sabit kanatları yanma prosesinden doğrudan gelen en yüksek sıcaklıktaki gaz deşarjına maruz kalmaktadır. Bu koşullar altında sıklıkla çatlak ve oksidasyon durumları ortaya çıkmaktadır. İkinci, üçüncü ve sonraki kademe kanatlar ise daha düşük çalışma sıcaklıklarıyla birlikte deformasyona ve kritik aksenal boşlukların kapanmasına yol açabilen yüksek oranda eğilme yüklerine maruz kalabilmektedir. Bir dereceye kadar kanatlardaki bozulmalar tolere edilmektedir ve onarımın ne zaman gerekli olduğunu belirlemek için kriterler belirlenmiştir. Ancak, genel bir kural olarak günümüzde yüksek yanma sıcaklıklarında çalışan gaz türbinlerinde birinci, ikinci ve üçüncü kademe kanatlar sıcak gaz yolu muayenelerinde yenileriyle değiştirilmektedir. 4 kademeli türbinlerde 4. kademe, 5 kademeli türbinlerde ise

5. kademe hareketli ve sabit kanatlar daha uzun süre (yaklaşık 100 000 EOH) kullanıldıktan sonra yenileriyle değiştirilmektedir.

4.2.5. Majör (büyük) muayene ve bakım

Majör bakımın amacı, gaz türbininin girişinden egzozuna kadar tüm döner ve sabit bileşenleri incelemektir. Büyük çaplı bir bakım programı, gaz türbinine daha önce uygulanan boroskop incelemeleri ve sıcak gaz yolu muayenelerinin sonuçlarına göre planlanmalıdır. Majör bakımın kapsamı, gaz türbininin normal çalışması sırasında bozulmaya maruz kalan tüm bileşenlerinin incelenmesini içermektedir. Bu bakım, yanma ve sıcak gaz yolu muayenelerinin tüm kapsamlarını içererek gaz türbininin tamamının yatay bağlantılara kadar açılmasını gerektirmektedir. Majör bakım kapsamında tüm üst muhafazaların sökülmesi, kompresör hareketli ve sabit kanatlarının yanı sıra yatak tertibatlarına da erişim sağlamaktadır. Muhafazaları, kovanları ve çerçeveleri çıkarmadan önce ünite uygun şekilde desteklenmelidir [27].

4.2.6. Gaz türbini muayene ve bakım aralıkları

Gaz türbinlerinde uygulanan muayene ve bakım tiplerinin sınıflandırmaları birçok farklı türbin üreticisi için benzerlik gösterse de türbinlere uygulanan bakım aralıkları için belirlenen kriterler farklılık göstermektedir.

Gaz türbini bileşenlerinin ömrünü etkileyen ve bileşen mekanizmalarının bozulmasından sorumlu olan farklı faktörler vardır. Bunlar genel olarak şu şekildedir:

- Yakıt
- Ateşleme sıcaklıkları
- Buhar/su enjeksiyonu
- Sürekli çalışma (santrifüj yükler, sıcaklık yükü, korozyon ve oksidatif ortam, erozyon, vb.)
- Çevrimsel çalışma (termal stres, vb.)
- Pik yükte çalışma (termal mekanik gerilimler, vb.)
- Rastgele olaylar (yabancı cisim hasarı, soğutma havası deliklerinin tıkanması, arızalı çalışma, frekans dışı çalışma, vb.)

Termal-mekanik yorulma (TMF), pik yükte çalışan türbinler için önemli bir ömür sınırlayıcı faktör iken, sürünme, oksidasyon ve korozyon sürekli yükte çalışan türbinler için baskın

sınırlayıcılardandır. Tipik bakım muayenelerinin (yanma, sıcak gaz yolu ve majör) kapsamı, maliyeti optimize etmek ve ünitenin emre amadeliğini en üst düzeye çıkarmak için farklı orijinal ekipman üreticileri (OEM) tarafından tanımlanmıştır. OEM'ler bakım aralıklarını tanımlamak için "Faktörlü saat" (FH) veya "Eşdeğer işletme saati" (EOH) gibi kendi kurallarını geliştirmiştir. OEM formülasyonlarından hangi spesifik bileşenin bakım eylemini yönlendiren zayıf halka olduğu kolayca anlaşılammaktadır. Altta yatan bu belirsizlik, yüksek bakım hata oranlarına veya üretim süresi kaybına neden olabilmektedir. Bakım aralıklarının çok düşük tutulması ünite açısından daha koruyucu olmakla birlikte parçaların erkenden kullanım dışına ayrılmasına yol açabilmektedir [9].

Örneğin, eski tip E ve F sınıfı gaz türbinleri için yanma, sıcak gaz yolu ve majör bakım aralıkları sırasıyla 8000, 24 000 ve 48 000 FH idi. Modern, gelişmiş sınıf gaz türbinlerinde bu aralıklar emre amadeliği artırmak için daha uzundur. Örneğin, GE'nin HA sınıfı gaz türbinlerinde ayrı bir yanma bakımı ortadan kaldırılarak 25 000 FH veya 900/720 FS'de, hangisi önce gelirse, sıcak gaz yolu bakımı ile birleştirilmiştir. Majör bakım aralığı ise 50000 FH veya 1.800/1.440 FS'dir [26].

4.2.7. Faktörlü başlatma (FS) ve faktörlü saat (FH)

Faktörlü başlatma terimi, gaz türbininde gerçekleşen başlatmaların normal baz yük başlatması olarak adlandırılan bir temel başlatma ile referanslandırıldığı anlamına gelmektedir. Farklı başlatma veya trip türlerinde meydana gelen hasarları hesaba katmak için normal baz yük başlatma-durdurma döngüsüne GE'nin göreceli önem kriterlerini yansıtan faktörler uygulanmaktadır. Örneğin, hesaplanan başlatmalara dayalı sıcak gaz yolu bakım aralığı GE tarafından aşağıdaki şekilde belirlenir [9]:

$$\text{Bakım aralığı (başlatma)} = \frac{S}{\text{Bakım faktörü}} \quad (4.5)$$

$$\text{Bakım faktörü} = \frac{\text{Faktörlü başlatma(FS)}}{\text{Gerçekleşen başlatma}} \quad (4.6)$$

Denklemden S, başlatmaya dayalı azami bakım aralığını ifade etmektedir.

Benzer şekilde faktörlü saat terimi, doğal gaz ile gerçek çalışma saatlerinin su veya buhar enjeksiyonu olmaksızın baz yükte çalışma temeline göre düzeltildiği anlamına gelmektedir. Örneğin, hesaplanan saatlere dayalı sıcak gaz yolu bakımı GE tarafından aşağıdaki şekilde belirlenir [9]:

$$\text{Bakım aralığı (saat)} = \frac{24\ 000}{\text{Bakım faktörü}} \quad (4.7)$$

$$\text{Bakım faktörü} = \frac{\text{Faktörlü çalışma saati (FH)}}{\text{Gerçekleşen çalışma saati}} \quad (4.8)$$

Başlatma (yorulma) ve çalışma saatleri (sürünme) arasında herhangi bir ilişki olmadığı varsayımı diğer OEM'ler tarafından desteklenmemektedir. Sürünme kaynaklı hasarın bir metalin yorulma ömrünü azaltacağını ve yorulma kaynaklı hasarın metalin sürünme ömrünü azaltacağını gösteren çok sayıda kanıt vardır [9].

Ayrıca diğer bir gaz türbini üreticisi olan Siemens de eşdeğer işletme saati (EOH) yöntemi ile bakım aralıklarını belirlemektedir.

4.2.8. Eşdeğer işletme saati (EOH)

Muayene ve bakımlar arasındaki gaz türbini çalışma süresinin en yüksek yük ve gerilimlere sahip parçaların kümülatif aşınmasına dayandırılarak elde edilen formüllere göre hesaplanan çalışma süresine eşdeğer işletme saati (EOH) adı verilmektedir. Gaz türbinlerinin farklı koşullar altında çalışmalarına rağmen EOH formüllerine göre elde edilen eşdeğer işletme saati değeri, muayene ve bakım gerekliliği yönünden bir değerlendirme yapmaya olanak sağlamaktadır. Aşağıdaki hesaplama yönteminde Siemens firmasının kullanmış olduğu EOH formülasyonu verilmiştir [4].

$$t_{EOH} = a_1 n_1 + a_2 n_2 + \sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^{n_{OH}} (f_i w_i b_i \Delta t_i) \quad (4.9)$$

t_{EOH} : Eşdeğer işletme saati (EOH)

a_1 : Başlatma faktörü

n_1 : Başlatma sayısı

a_2 : Hızlı yüklemelerin faktörü

n_2 : Hızlı yüklemelerin sayısı

n : Hızlı sıcaklık değişikliklerinin sayısı

t_i : Hızlı sıcaklık değişiklikleri için eşdeğer işletme saati

n_{OH} : İşletme sırasındaki veri noktalarının sayısı

f_i : Yakıt faktörü

w_i : Su faktörü

b_i : İşletim faktörü

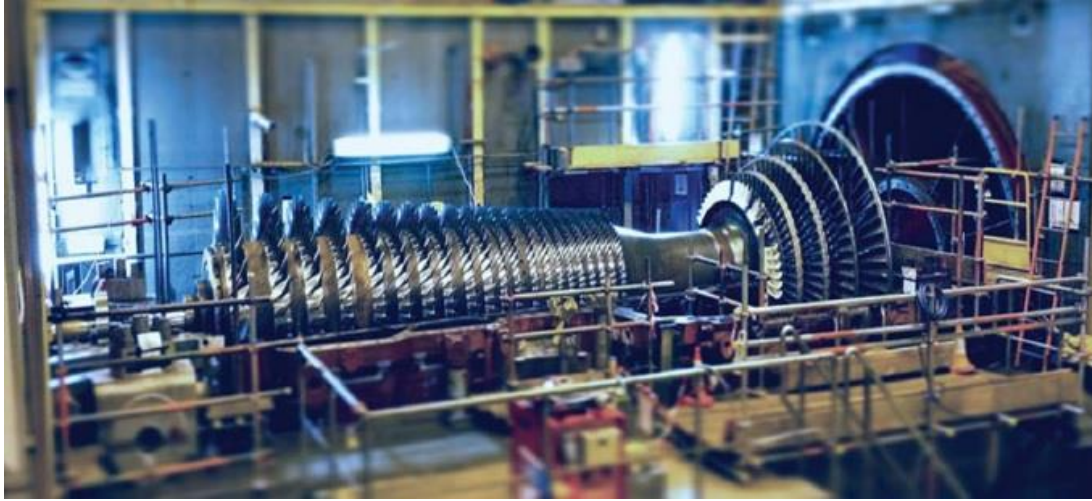
Δt_i : İki veri noktası arasındaki süre



5. GAZ TÜRİNİ C TİPİ BAKIM ÇALIŞMASI

5.1. Giriş

Bu çalışmada, EÜAŞ Tekirdağ Doğalgaz Kombine Çevrim A Santrali'ndeki, 1996 yılında imal edilmiş olan ALSTOM (GE) GT13E2 model, çevresel yanma odalı, NO_x kontrollü, çoklu yakıclı (72 adet) ve çift yakıtı uygun bir gaz türbininin C tipi (combustion) bakımı incelenecektir. Türbin yanma odası sıcaklığı 1100 °C ve egzoz sıcaklığı 550 °C olarak sistem dizayn edilmiştir. Türbin nominal güç değeri ise ISO şartlarında 160 MW'tır. Kompresör kademe sayısı 21, IGV kademelerinin sayısı 1'dir. Türbin kanatları 5 kademelidir.



Resim 5.1. Alstom (GE) GT13E2 gaz türbini

Seçilen türbindeki bakım çalışması 8. C tipi bakımdır. Bakım çalışmalarına başlamadan önce gaz türbini kayıtlı verileri alınarak Çizelge 5.1 oluşturulmuştur. Bu verilere göre bakım kapsamına alınan ünitenin ilk kurulumdan bu yana 171 988 saat çalıştığı ve bu çalışma süresince türbinin devreye girip çıkma sayıları, plansız ani duruşları (trip) ve birçok farklı parametre ve etki faktörlerine göre hesaplanan eşdeğer işletme saati değeri (EOH) 223 312 saat olarak kayıt altına alınmıştır. En son yapılan 7. C tipi bakımdan bu yana 40 036 EOH geçtiği görülmüştür. Bu durum mevcutta uygulanması gereken 24 000 veya 32 000 EOH C tipi bakım periyodunun üzerindedir. Periyodik bakım kapsamında elde edilen bulgular bu durumun değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

Çizelge 5.1. İşletme kayıt cihazı verileri

Sıra No	Adı	Açıklama	7. C Tipi Bakımdan İtibaren	İlk Kurulumdan İtibaren Toplam Değer
1	OH	İşletme saati	28 811 saat	171 988 saat
2	COH	Düzeltilmiş işletme saati	31 097 saat	176 551 saat
3	EOH	Eşdeğer işletme saati	40 036 saat	223 312 saat
4	S	Devreye alma adeti	148 adet	490 adet
5	T	Devreden çıkma (trip) adeti	51 adet	201 adet

5.2. Bakım Öncesi ve Demontaj

5.2.1. Bakım öncesi yapılacaklar

- Bakım yapılacak sahanın hazırlanması,
- Bakımda kullanılacak malzeme, yedek malzeme, özel takımların ayarlanması,
- Çalışma izinlerinin alınarak gerekli iş sağlığı ve iş güvenliği kontrollerinin yapılması,
- Türbinin devreden çıkarılmasından önce işletme kayıtlarının alınması, analizi, düzensizliklerin tespit edilmesi ve arıza listelerinin incelenmesi,
- Bakım öncesi kompresör girişi, türbin çıkışı, yanma odası ve difüzörde genel olarak gözle muayenelerin yapılması,
- Türbin izolasyonlarında ve izolasyon yastıklarında durum tespiti yapılması, çözümlerin incelenmesi, yanma izlerinin kontrol edilmesi,
- Egzoz kanalında ve sac malzemelerde hasar, kayma, boşluk, yanma izleri ve yağ kaçaqlarının gözden geçirilmesi,
- Ünitenin devreden çıkarılması,
- Ünitenin soğuması için gerekli sürenin beklenmesi.

5.2.2 Türbin demontajının kapsamı

- Termal blok üzerindeki muhafazanın sökülmesi,
- İşçi çalışma alanlarının açılması ve gerekli iç aydınlatmanın sağlanması,
- Türbin izolasyon ve yastıkların sökülmesi,
- Sistemdeki yağın drenajının yapılarak uygun bir depolama kabına boşaltılması,
- Enstrümanların sökülmesi,

- Hava giriş ve egzoz üst karkaslarının (casing) sökülmesi,
- Yakıcıların sökülmesi,
- Kompresör ve yanma odası üst dış karkaslarının (casing) sökülmesi,
- Yanma odası muhafazalarının ve üst parçalarının sökülmesi,
- Generatör ile kaplin bağlantılarının ayrılması,
- Yatakların üst muhafazalarının sökülmesi,
- Mevcuttaki hassas ölçülerin alınarak kaydedilmesi,
- Rotorun taşıyıcı sehpa üzerine alınması,
- Alt gövde ve yakıcı alt parçalarının sökülmesi,
- Türbin alt kanat taşıyıcıların sökülmesi.

5.3. Türbin Ekipmanında Yapılacak Ölçüm, Kontrol, Muayene ve Bakım İşlemleri

5.3.1. Kompresör

Hava girişi

- Filtre odaları, hava giriş kanalları ve susturucularda kalıntı malzeme (deposit), hasar, korozyon ve yabancı cisimlerin kontrolü, tespiti, gerekli muayenelerinin yapılarak bakım ve temizliğinin yapılması,
- Filtrelerin durumlarının tespiti, gerekli görülmesi halinde yenilenmesi,
- Kompresör girişinde, yatak muhafazasında, desteklerde ve genel yapısında kalıntı malzeme (deposit), hasar, korozyon ve yabancı cisimlerin kontrolü, tespiti, gerekli muayenelerin yapılarak bakım ve temizliğinin yapılması.

Kompresör muhafazası (casing) ve difüzör

- Adam girme kapaklarının (manhole) ve muayene deliklerinin (inspection hole) demontajı,
- IGV ekipmanında kalıntı malzeme (deposit), hasar, korozyon ve yabancı cisimlerin kontrolü, tespiti, gerekli muayenelerin yapılarak bakım ve temizliğinin yapılması,
- Akış yönünde (direction of flow) ön kenar (leading edge) ve arka kenarda (trailing edge) malzeme deformasyonu ve çatlak muayenelerinin yapılması,
- Hidrolik silindirdeki o-ringler ve sızdırmazlıkların değiştirilmesi,

- IGV transmisyon ve sabit elemanlarının, geçişlerin muayenesinin yapılması,
- IGV hareket bölgesinde temas yüzeylerinde sürtmelere bağlı aşınmaların muayenesinin yapılması,
- IGV Kanatlarda açı ölçümlerinin yapılarak hareket düzgünlüğünün ve tutarlılığının muayenesinin yapılması,
- Blow-off valflerinin, susturucuların ve aktüatörlerin gözle kontrollerinin yapılarak muayenelerinin ve fonksiyon testlerinin gerçekleştirilmesi,
- Sızdırmazlık ekipmanı, oluklar ve civataların gözle kontrollerinin yapılması.

Rotor

- Rotor boşluk değerleri ve hassas ölçülerinin alınarak kaydedilmesi,
- Kompresörün tüm kademelerdeki kanatlarının, sabit kanat taşıyıcılarının, rotor ve statorunun ve bağlantı parçalarının gözle kontrolü ve muayenesinin yapılması,
- Kalıntı malzeme, kaplama kalınlığı, korozyon, erozyon vb. muayenelerinin yapılması,
- Kanatlarda akış yönünde ön kenar ve arka kenarda malzeme deformasyonu ve çatlak muayenelerinin yapılması,
- Belirlenen kademelerde tahribatsız muayene testlerinin yapılması,
- Kanat profil yüzeyinde çevresel (circumferential) yönde deformasyon muayenesinin yapılması,
- Kanat uçlarında dairesel sürtmelerin ve boşlukların muayenesinin yapılması,
- Kompresör hareketli kademe (VLa) kanatların temizleme işlemleri, gözle muayene ve tahribatsız muayenelerinin yapılması,
- Rotor kompleksinin döner taşıyıcı sehpa üzerine alınması.

5.3.2. Türbin

Türbin muhafazası (casing)

- Adam girme kapaklarının (manhole) ve muayene deliklerinin (inspection hole) demontajı,
- İlk ve son kademe kanat boşlukları hassas ölçülerinin alınarak kaydedilmesi,
- Temizlik ve gözle muayenenin yapılması,

- Gözle muayene ve türbin sabit kanat taşıyıcı elemanlarının tahribatsız muayenelerinin yapılması.

Rotor

- 1. 2. ve 3. kademe sabit kanatların ve diğer komponentlerinin (stator heat shield vb.) değişiminin yapılması,
- 4. ve 5. kademe kanat köklerinde hassas kontrollerin yapılması,
- 4. ve 5. kademe kanatların sökülmesi, temizlenmesi, gözle ve tahribatsız muayenelerinin gerçekleştirilerek gerekirse yenileri ile değiştirilmesi,
- 1. kademe kanatların hassas radyal boşluklarının sağlanması için uçlarının taşlanması.

5.3.3. Yanma ünitesi

Yanma odası

- Gözle muayene yapılması,
- Yanma odası adam girme kapağı açılarak birinci bölge dış, iç ve ön segmentler ile ikinci bölge iç ve dış duvar yüzeyleri kontrolleri ve değiştirilmesi,
- Yakıcı deliği, alev monitörü, çakmak torcu, titreşim probu, iç ve dış segment taşıyıcıları kenarlarında, yüzeylerinde ve bağlantı deliklerinde çatlak, akışa bağlı malzeme kaybı, erozyon ve kırık muayenelerinin yapılması,
- Çekiçleme ve darbe (hammering) izlerinin muayenesi, deformasyon, oturma yüzeyinin uygunluğu, hizalanması ve toleransların muayenesinin yapılması.

Yanma odası tuğlaları ve bağlantı parçaları

- Oturma yüzeyi uygunluğu, çatlak, kırık, erozyon, köşelerde, kenarlar boyunca ve sıcak gaz temas yüzeyinde malzeme kaybı muayenelerinin yapılması,
- Çekiçleme ve darbe (hammering) izlerinin, aşınmaların, çatlakların, deformasyon ve form kayıplarının muayenesinin yapılması,
- Yakıcılarda termal kaplamada soyulma, hasar, aşırı ısı belirtileri, iç çapta çatlaklar, dış kenarlarda çatlaklar, oturma yüzeyinin uygunluğu vb. muayenelerin yapılması ve değiştirilmesi.

Yakıcılar

- Yakıcı borularında solma, çarpılma, çatlakların gözle muayenesinin yapılması ve bağlantıların kontrolü,
- Yakıcı desteklerinin muayenesinin yapılması,
- Yakıcı manşonlarında çatlak, deformasyon, açıklık ve tıkanma kontrollerinin yapılması,
- Yakıcıların değiştirilmesi,
- Ateşleyicilerin sökülmesi, tümünde yapılacak temizlik ve muayene sonucuna göre değiştirilmesi gerekenlerin değiştirilmesi, onarılabilecek durumda olanların onarılması,
- Ateşleme trafolarının test edilmesi ve düzeltici faaliyetlerin gerçekleştirilmesi.

5.3.4. Türbin çıkışı

Egzoz difüzörü

- Gözle muayene yapılması,
- Akış Yönlendirici elemanda hasar muayenesinin yapılması,
- Egzoz difüzörde yabancı cisim etkisi, deformasyon, çökme, çatlak, oturma yüzeylerinin uygunluğu muayenelerinin yapılması,
- Termokupplarda muayenelerin (hasar, fonksiyon, oturma uygunluğu) yapılması.

5.3.5. Yataklar

Kompresör yatağı

- Kompresör yatağı, kompresör yatak muhafazasında, kaidesinde, geri dönüş, sızıntı, giriş yağ hatlarında gözle muayenelerinin yapılması,
- Şaft sızdırmazlıklarının kontrolünün yapılması,
- Rotor kaldırma yağı hortumlarının muayenesinin yapılması,
- Yatak muhafazası ve yatağın (bearing) demontajının yapılması,
- Yataklarda aşınmaların (wearing) kontrolü, işlenmiş yüzeylerin kontrolü, yatak madeninin (babbit malzeme) ve bağlantıların (bonding) kontrolü,
- Tahribatsız muayenelerin (NDT) yapılması (penetrant ve ultrasonik), gerekli minör düzeltmelerin yapılması.

Türbin Yatağı

- Türbin yatağı, türbin yatak muhafazasında, kaidesinde, geri dönüş, sızıntı, giriş yağ hatlarında gözle muayenelerinin yapılması
- Şaft sızdırmazlıklarının kontrolünün yapılması,
- Rotor kaldırma yağı borularının muayenesinin yapılması,
- Yatak muhafazası ve yatağın (bearing) demontajının yapılması,
- Yataklarda aşınmaların (wearing) kontrolü, işlenmiş yüzeylerin kontrolü, yatak madenin (babbit malzeme) ve bağlantıların (bonding) kontrolü,
- Tahribatsız muayenelerin (NDT) yapılması (penetrant ve ultrasonik), gerekli minör düzeltmelerin yapılması.

5.3.6. Kaplinler

- Kaplinin sökülmesi, civataların boyutsal kontrollerinin ve temizliklerinin yapılması,
- Kaplin ayarının yapılması,
- Salgı kontrollerinin yapılması.

5.3.7. Döndürme tertibatı (virör)

- Gözle muayenenin yapılması,
- Yağ beslemesinin, hidrolik devrenin (Hidrolik döndürme dişlisi, hidrolik motor, flanşlar, yön kontrol, emniyet valfleri, manometreler, yağ hortumları vb.) tümünün kontrolünün yapılması,
- Fonksiyon testlerinin gerçekleştirilmesi.

5.3.8. Acil durdurma valfleri (ESV), kontrol valfleri (CV), sızdırmazlık ve drenaj valfleri

- Doğalgaz ve motorin kontrol ve acil durdurma valflerinin gözle muayenesi ve fonksiyon testlerinin yapılması,
- Su tasfiye (purge water) sisteminin gözle genel muayenesinin yapılması.

5.3.9. Yağlama sistemi, borular, pompalar ve motorlar

- Yağlama yağı tankında gözle muayene yapılması ve ihtiyaç halinde düzeltici bakım ve onarım işlemlerinin gerçekleştirilmesi,
- Yağlama sistemine ait pompaların gözle muayenesi ve fonksiyon testlerinin yapılması,
- Yağ filtre sisteminin tümünün kontrolünün yapılması, filtrelerin yenileri ile değiştirilmesi, filtre sisteminde düzeltici bakım ve onarım işlemlerinin yapılması,
- Yağlama sistemine ait motorların gözle muayenesi, elektriksel ve mekanik bağlantıların kontrol edilmesi, çalışma sırasında amper ve titreşim kontrollerinin yapılması, fonksiyon testlerinin gerçekleştirilmesi, gerekmesi halinde motorların sökülerek bakım ve onarımının yapılması veya yenisi ile değiştirilmesi,
- Sistemdeki tüm boruların, bağlantı flanşlarının, desteklerinin kontrollerinin yapılması.

5.3.10. Koruma ve kontrol sistemi

- Aktüatörler, alev dedektörleri, titreşim ve genişleme dedektörleri, hız izleme monitörleri, termokupllar, şaft pozisyonları, flapların son konum ve tork sviçlerinde, sıcaklık koruma sisteminde, aşırı hız koruma sisteminde, alev monitöründe, türbin koruma sistemlerinde, ölçüm ve kayıt sistemlerinde görsel muayene, fonksiyon testleri, aşınma ve yıpranma kontrolleri, ayarlamaları, yenileme işlemlerinin gerçekleştirilmesi.

5.4. Türbin Montajı ve Devreye Alınması

- Türbin alt gövde, alt yatak ve kanat taşıyıcıların ve rotorun yerine konması, boşlukların ölçülmesi, gerekli ayarların yapılması,
- Üst türbin kanat taşıyıcıların konulması ve boşluk kontrolünün yapılması,
- Montaj prosedürüne göre tüm parçalar ve yardımcı sistem ekipmanının montajının yapılması,
- İzolasyon yastıkları ve sargılarının tamamlanması,
- Muhafazaların kapatılması,
- Devreye alma ve I&C ekipleri tarafından tüm son kontroller ve testlerin yapılarak ünitenin işletmeye hazır hale getirilmesi.

5.5. Bakım Bulguları ve Düzeltici Faaliyetler

GT13E2 model gaz türbininde bakım çalışmaları kapsamında elde edilen önemli bulgular ve bunlara ilişkin düzeltici faaliyetler aşağıda belirtilmiştir.

Resim 5.2’de gösterilen türbin hava giriş sistemindeki filtre odasının girişindeki kanatlarda kirlilik ve kanat yüzeylerinde sert ve kabuklaşmış kalıntılar tespit edilmiştir. Bu durumun çevre havasındaki kirlilikten kaynaklandığı ve bir önceki bakımdan bu yana geçen zaman içerisinde havadaki partiküllerin kanat yüzeylerine dış ortam nemi ile yapışarak zamanla sertleşme ve kabuklaşmaya yol açtığı değerlendirilmiştir. C tipi bakım kapsamında su jeti yardımıyla tüm kalıntı kirlilikler ve sert ve kabuklaşmış kalıntılar yüksek basınçlı su ile temizlenerek giderilmiştir.



Resim 5.2 Hava giriş kanatları [7]

Resim 5.3'te gösterilen filtre giriş ızgarasında ölü böcek kalıntıları ve yağlı siyah tortular bulunmuştur. C tipi bakım kapsamında giriş havasının geçtiği tüm ince filtreler değiştirilmiştir fakat kalın filtrelerin değiştirilmesine santral işletmecisi tarafından gerek görülmemiştir. Sonraki bölümlerde giriş hava filtrelerindeki basınç düşüşü ve türbin giriş havasına etkileri değerlendirilecektir.



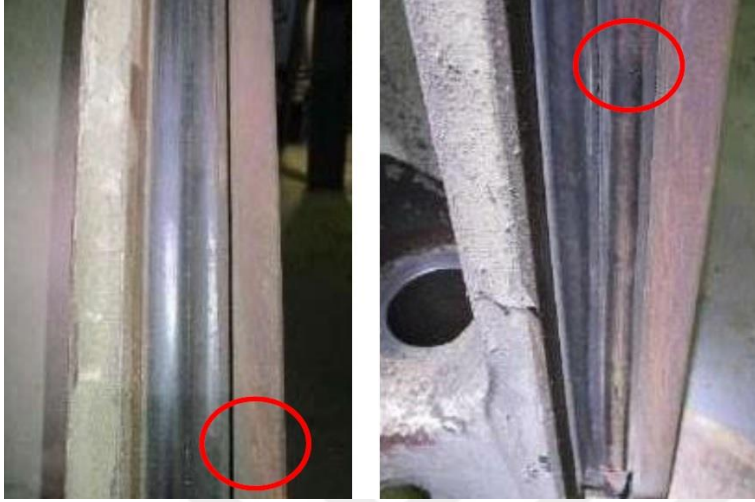
Resim 5.3. Filtre giriş ızgarası [7]

Resim 5.4'te gösterilen hava giriş sistemindeki hava kanallarının iç yüzeylerinde sistem çalışırken sisteme giren hava içerisindeki nem ve tuz nedeniyle boyalı yüzeylerde soyulmalar ve bu bölgelerde paslanmaların meydana geldiği tespit edilmiştir. Bakım kapsamında tüm kanalların temizliği yapılmıştır. Soyulan boyalı yüzeyler ve paslı bölgeler zımpara işlemi yapıldıktan sonra yeniden bölgesel olarak boyanmıştır.



Resim 5.4. Hava kanalları [7]

Resim 5.5'te gösterilen türbin hava giriş üst muhafazası birleşme yüzeyindeki kauçuk sızdırmazlık contasında aşınma ve yırtılma olduğu tespit edilmiştir. Bakım kapsamında sızdırmazlık contası yenisi ile değiştirilmiştir.



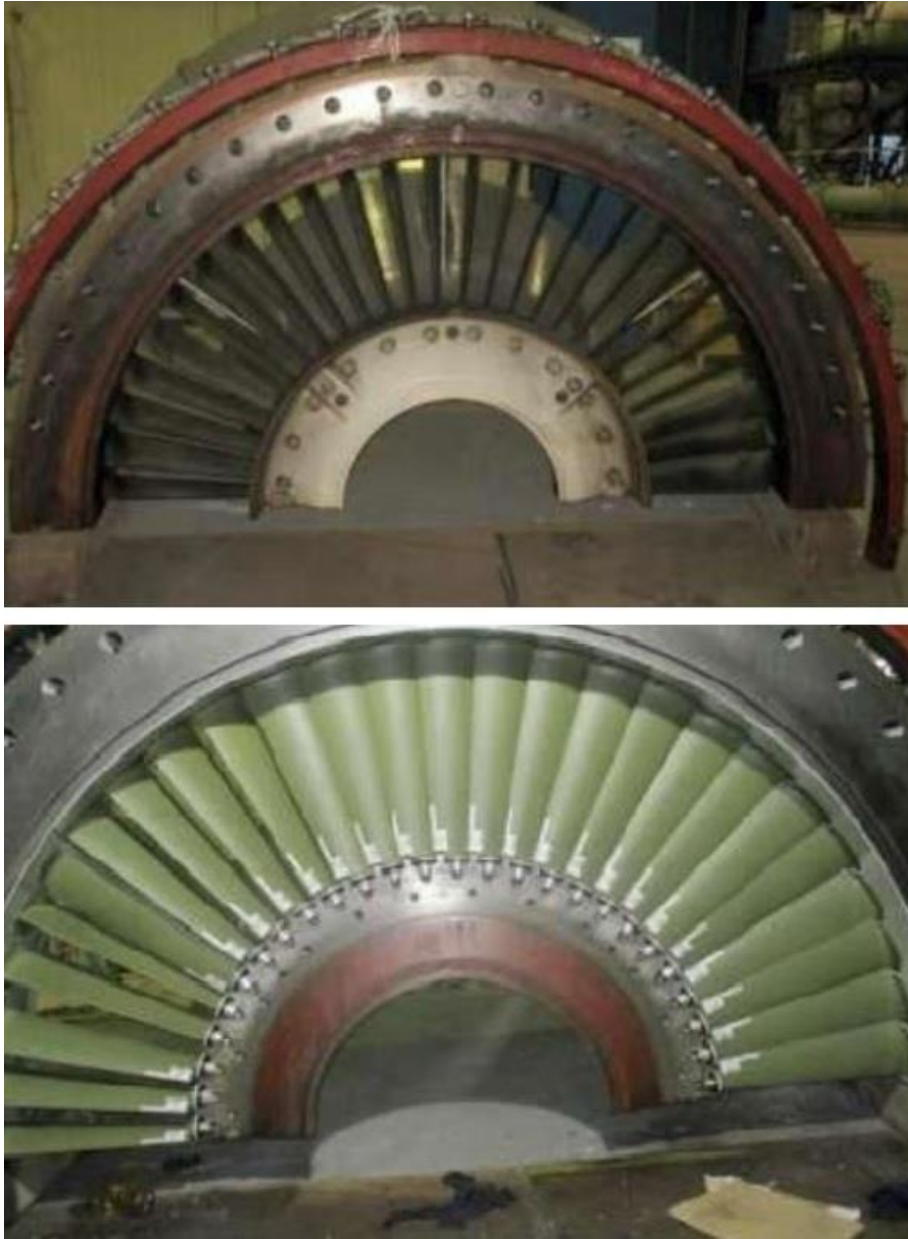
Resim 5.5. Hava giriş üst muhafazası kauçuk sızdırmazlık contası [7]

Resim 5.6'da gösterilen ayarlanabilir giriş kılavuz kanatları (VIGV), leading-edge'ten (ön basınç kenarı) başlayarak her iki kanat profili boyunca kaplamada aşınma (erozyon) ve soyulma tespit edilmiştir. Ayrıca leading edge'te çukurcuk korozyonu başlamış ve yapışkan yağlı tortularla kirlilik kalıntıları (fouling) tespit edilmiştir. Bakım kapsamında, VIGV kanatlarının üç döngü bakım süresince değiştirilmemiş olması ve yedeklerinin depo stoklarında bulunması nedeniyle yenileriyle değiştirilmiştir.



Resim 5.6. Ayarlanabilir giriş kılavuz kanatları (VIGV) [7]

Resim 5.7’de gösterildiği üzere öncelikle ayarlanabilir giriş kılavuz kanatlarının (VIGV) temizlik işlemi yapılmıştır fakat yapılan temizlik sonrasında kanat kaplamalarının büyük oranda erozyona uğrayarak soyulmuş olduğu tam olarak gözlemlenmiştir. Sisteme giren havadaki yabancı maddelerin varlığının bu duruma neden olduğu değerlendirilmektedir. Bu partiküller deniz tuzu, su buharı, yağ buharı vb. ile birleşerek kanat yüzeylerinde erozyon ve kalıntı kirliliklere neden olarak kanatların akış profili şeklini de değiştirmektedir. Bu durumun sistem performansına da olumsuz etki edeceği değerlendirilerek mevcut kanatlar yeni VIGV kanatları ile değiştirilmiştir.



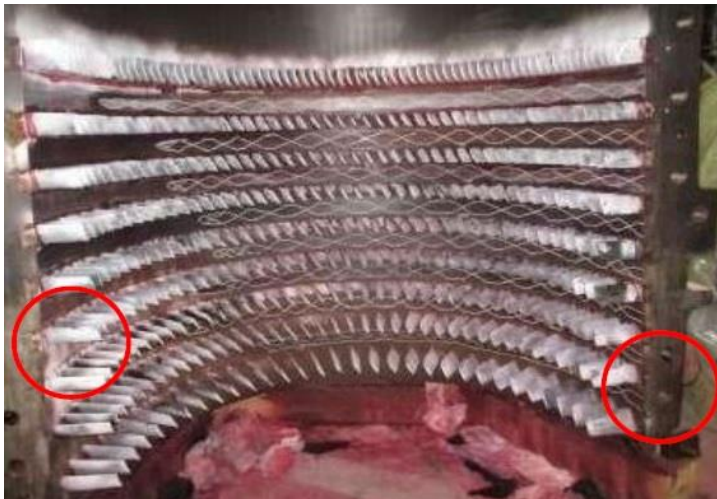
Resim 5.7. VIGV kanatlarının eski ve yeni hali [7]

Resim 5.8’de gösterilen VIGV ayar kollarında (tie-rod) kirlilik, yağ ve toz tespit edilmiştir. Bakım kapsamında gerekli temizlik işlemleri yapılarak çalışma mekanizmalarının kontrolleri yapılmıştır. Ayar kolları ve bağlantı mekanizmalarında herhangi bir olumsuzluk tespit edilmemiştir.



Resim 5.8. VIGV kanatlarının ayar kolları [7]

Resim 5.9’da gösterilen kompresör sabit kanat taşıyıcı (CVC) üst parça ve alt parçada iç yüzeylerde kirlenme ve korozyon tespit edilmiştir. Yapışma yüzeyi, civata deliği ve dişi diş kısmında aşınma tespit edilmiştir. Bakım kapsamında, çevresel tüm yüzeyler özel solvent ve deterjanla temizlenmiştir. Bileme taşı ile yapışma yüzeyi boyunca hassas yüzey temizleme yapılmıştır. Dişi civata deliğine kılavuz çekilerek dişler uygun forma getirilmiştir.



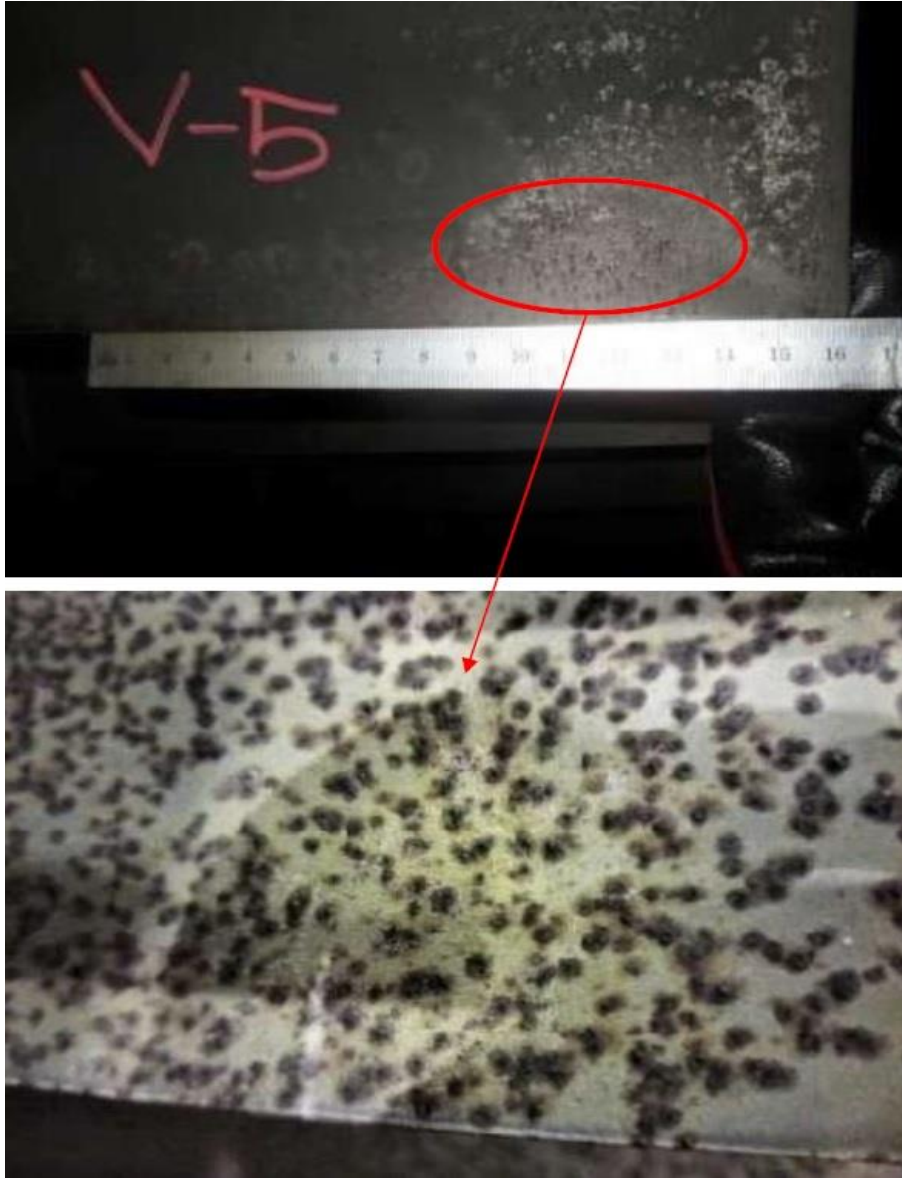
Resim 5.9. Kompresör sabit kanat taşıyıcısı (CVC) [7]

Resim 5.10'da gösterilen kompresör sabit kanatlarında (vane) 1. sıradan 4. sıraya kadar (4 dahil) kaplamanın yaklaşık %10'unda erozyon olduğu ve leading-edge'ten kanat profili boyunca kaplamada aşınmanın başladığı ve ayrıca yapışkan yağlı birikintilere sahip kirlenmelerin olduğu tespit edilmiştir. Bakım kapsamında kompresör sabit kanatlarında (vane) 1. sıradan 4. sıraya kadar (4 dahil) özel solvent ve temizlik malzemeleriyle temizlik işlemleri yapılmıştır. Bu bakım kapsamında ilk 4 sıranın değişimi öngörülmemiştir. Bir sonraki bakımda ilk 4 sıra kanatların temini yapılarak mevcut kanatların yeni kanatlar ile değiştirilmesi planlanmıştır.



Resim 5.10. Kompresör sabit kanatları (1-4. sıra) [7]

Resim 5.11’de gösterilen kompresör sabit kanatlarının (vane) 5. sıradan 12. sıraya kadar (12 dahil) her iki kanat profilinde yapışkan siyah tozlu kirlenme ve özellikle basınç tarafında kanatların %50’sinden fazla kısımlarında çukurcuk korozyonu tespit edilmiştir. Bakım kapsamında, kompresör kanatları (vane) 5. sıradan 12. sıraya kadar (12 dahil) özel solvent ve deterjan ile temizlenerek sert bulaşık süngeriyle parlatma işlemi yapılmıştır. Ayrıca temizlik ve parlatma işleminden sonra tahribatsız muayeneye tabi tutulmuştur. Yapılan sıvı penetrant muayenesinde çukurcuk korozyonu nedeniyle oluşan çukurların bir sonraki bakıma kadar çalışmasında bir sorun teşkil etmeyeceği öngörülmüştür. Sonraki bakımda tekrar tahribatsız muayene yapılarak kanatların durumuna göre gerekirse yeni kanatlar ile değiştirilmesine karar verilmiştir.



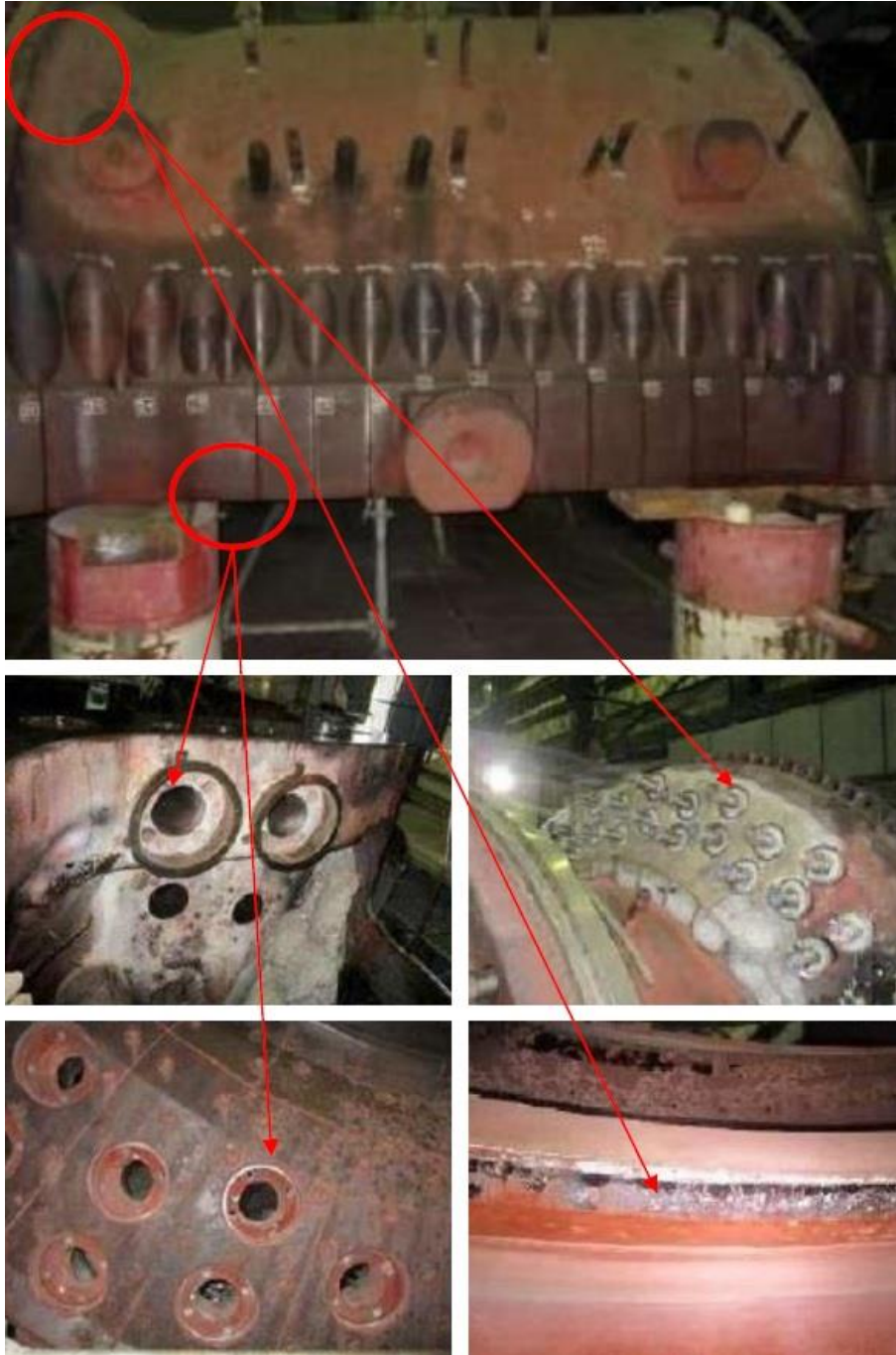
Resim 5.11. Kompresör sabit kanatları (5-12. sıra) [7]

Resim 5.12’de gösterilen kompresör difüzör gövdesinde (CDC) yapışma yüzeylerinde kalıntı kirlilikler ve korozyon tespit edilmiştir. Ayrıca Delmato sızdırmazlık contasında deformasyon ve yırtılma tespit edilmiştir. Bakım kapsamında, kompresör difüzör gövdesi her iki parçasının yapışma yüzeyleri bileme taşı ile hassas olarak temizlenmiştir. Delmato sızdırmazlık contası yenisi ile değiştirilmiştir.



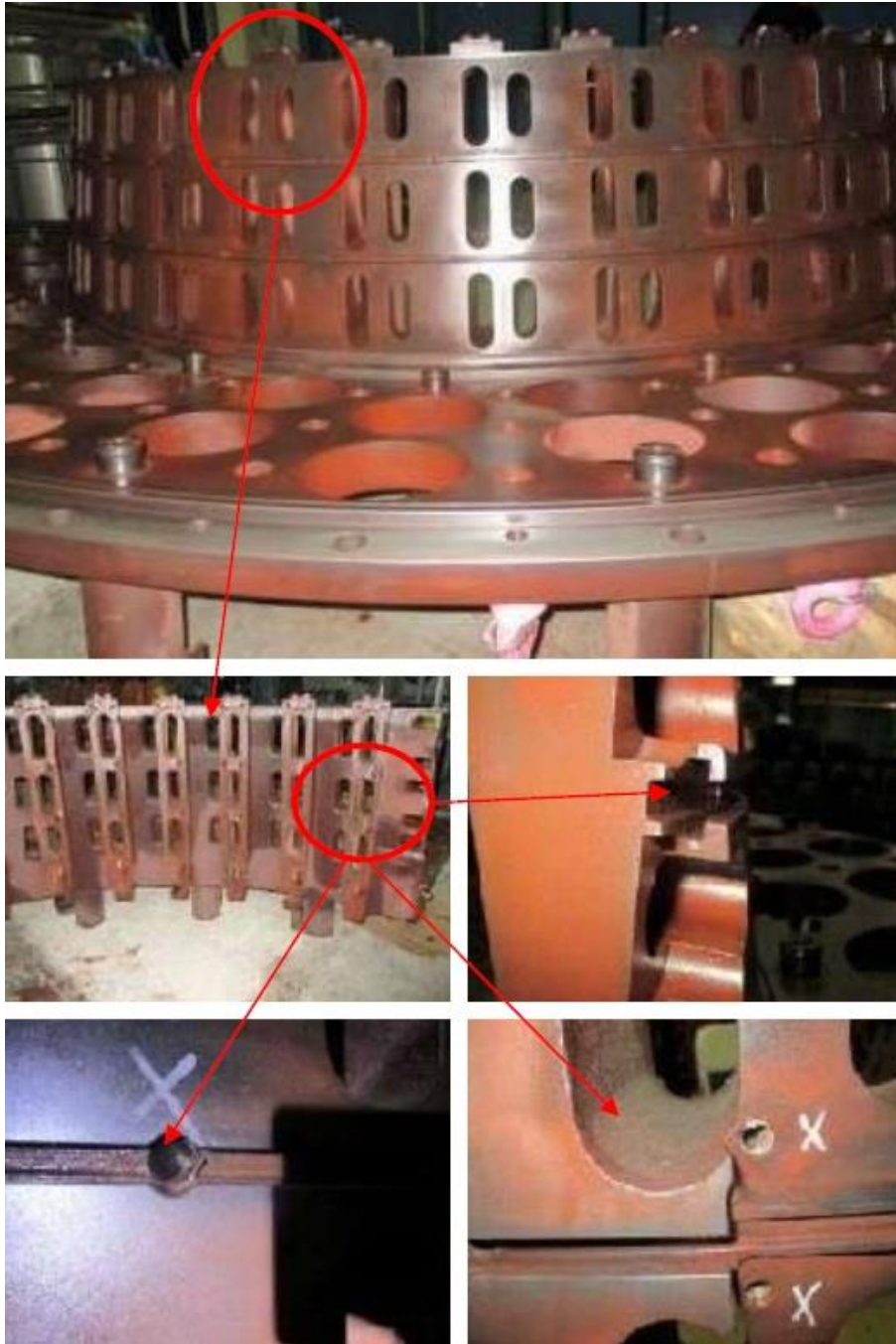
Resim 5.12. Kompresör difüzör gövdesi (CDC) [7]

Resim 5.13'te gösterilen yanma odası üst ve alt muhafaza delikleri ve bağlantı flanş yüzeylerinde kalıntı kirlilikler ve korozyon tespit edilmiştir. Bakım kapsamında, dış muhafazanın üst kısmından altına kadar komple temizleme ve yakıcı flanş iç yüzeylerine tahribatsız muayene ile kontrol işlemi yapılmıştır. Yapılan penetrant muayenesinde kabul kriterleri dışında bulunan herhangi bir süreksizlik tespit edilmemiştir. Birleşme yüzeyleri hem radyal hem de aksenel olarak temizlenerek yüzey iyileştirme yapılmıştır.



Resim 5.13. Yanma odası üst ve alt muhafazaları [7]

Resim 5.14'te gösterilen yanma odası iç segment taşıyıcısı üst ve alt parçalarında kirlenme, kalıntı, korozyon ve segment kanalında ve yüzeylerinde aşınma tespit edilmiştir. Birkaç nitrürlenmiş burçta yuvarlak dudaklarda hasar görülmüştür. Cıvata deliklerindeki helis yay bobinlerinde deformasyon görülmüştür. Bakım kapsamında, birleşme yüzeyleri ve segment oluşunda tüm çevre yüzeyler kuru buzla ve taşla temizlenerek tahribatsız muayene uygulanmıştır. Hasarlı nitrürlenmiş burçlar ve pimler yenileriyle değiştirilmiştir. Hasarlı helis yaylar yenileri ile değiştirilmiştir.



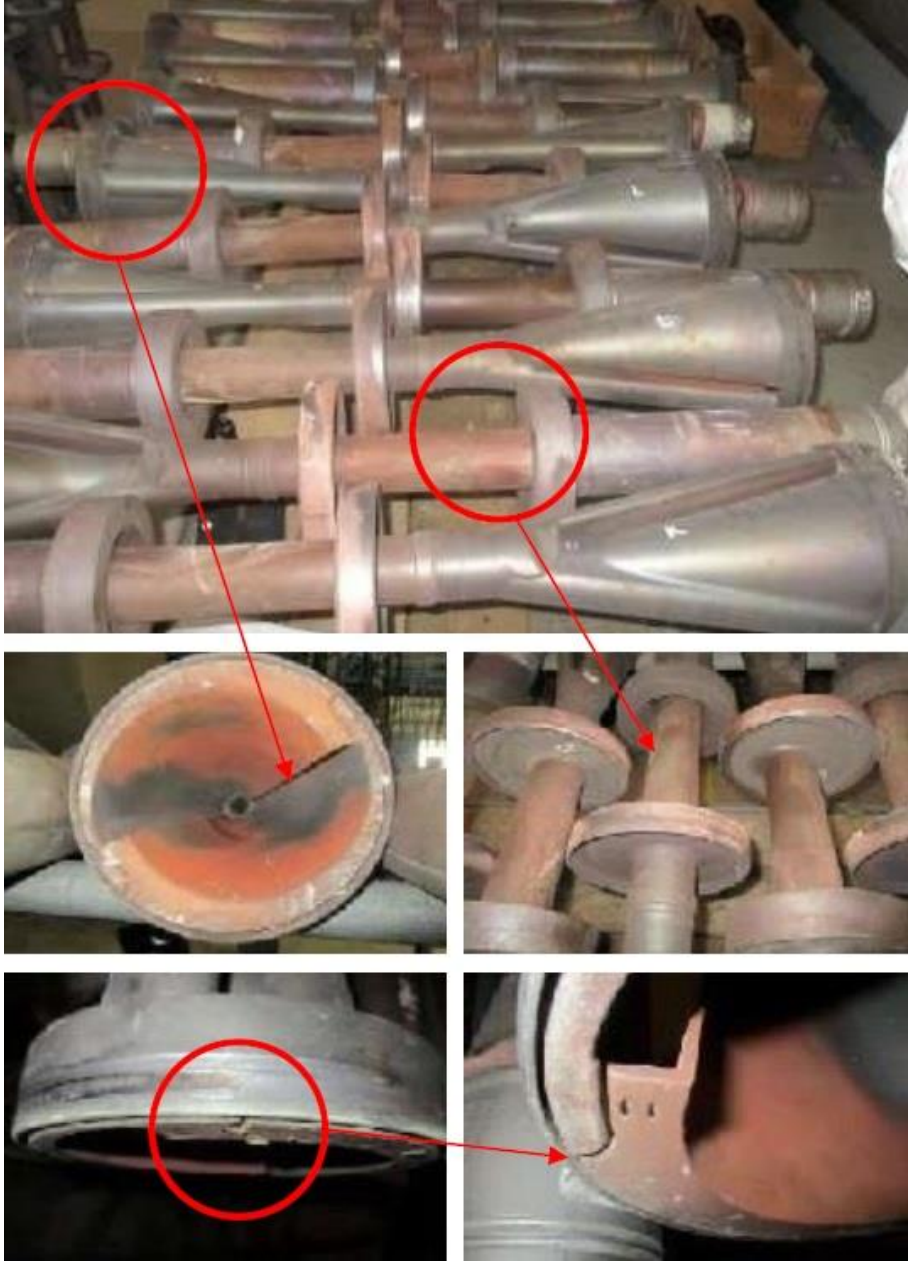
Resim 5.14. Yanma odası iç segment taşıyıcısı [7]

Resim 5.15'te gösterilen yanma odası birinci bölge ön segmentte kaplamada soyulmalar, piston segmanlarında aşınma ve kılavuz burçlarında korozyon tespit edilmiştir. İkinci bölge dış karkas ve soğutma kanalında kaplama hasarı, korozyon ve kalıntı kirlilik tespit edilmiştir. Deşarj yanakları dairesel yüzeylerde çatlamlar başlamıştır. Bakım kapsamında ön segment ve dış karkas parçaları yenileri ile değiştirilmiştir.



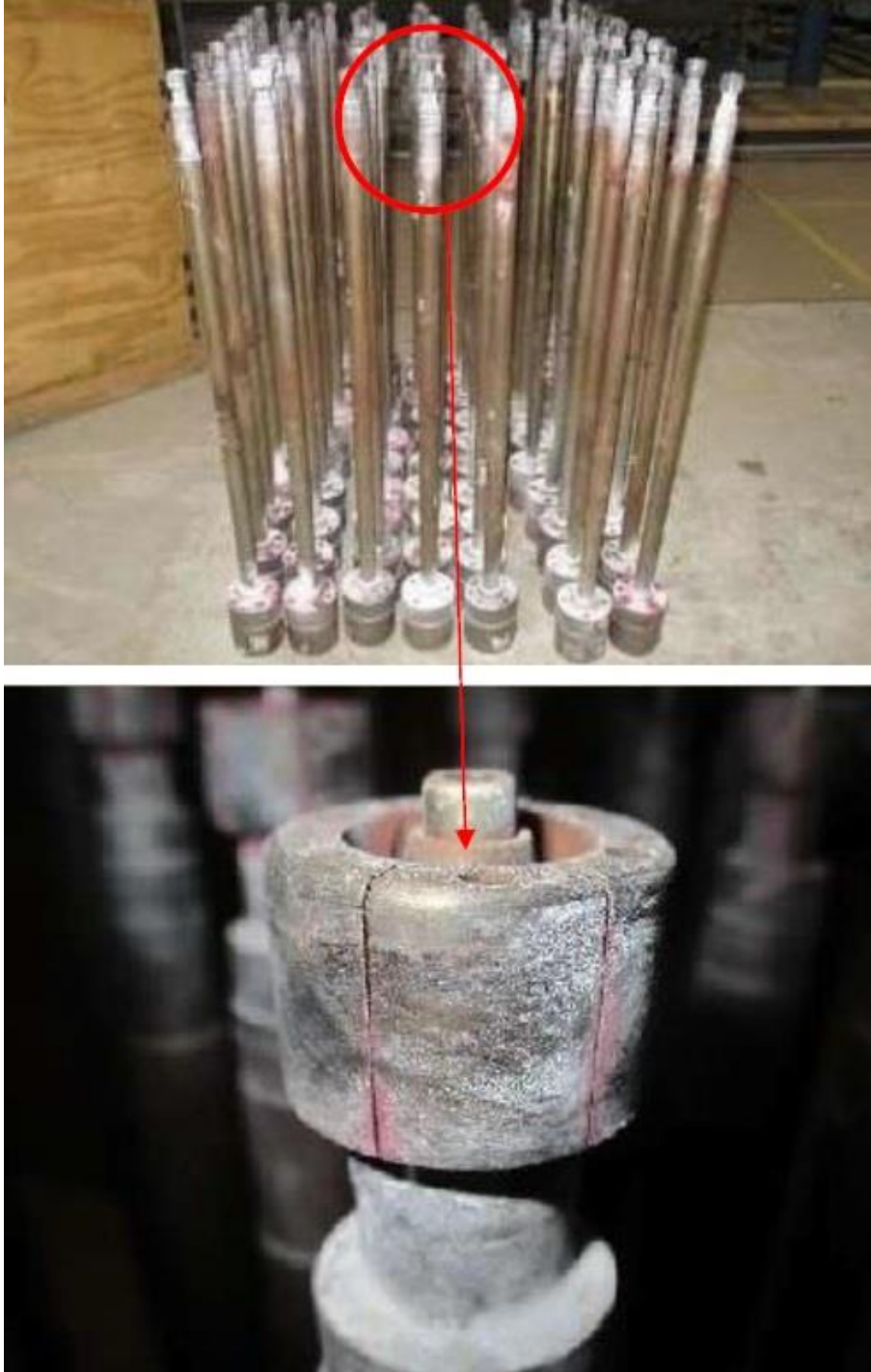
Resim 5.15. Yanma odası bölmeleri [7]

Resim 5.16'da gösterilen çevresel yakıcılarda konik kısımlarda renk değişimleri, ön halkalarda aşınma, kaplama hasarı ve kalıntı kirlilikler tespit edilmiştir. Gerilim giderme yuvalarında da deformasyon görülmüştür. Bakım kapsamında tüm yakıcılar 24 000 eşdeğer işletme saatinden (EOH) fazla çalışmış olmaları da değerlendirildiğinde yedek parça stokundaki yenileri ile değiştirilmiştir.



Resim 5.16. Türbin çevresel yakıcıları [7]

Resim 5.17'de gösterilen çevresel yakıcı lanslarında siyah yağlı kalıntılar, oksidasyon ve aşınma tespit edilmiştir. Lans kafalarında aşınma ve deliklerde renk değişimi tespit edilmiştir. Bakım kapsamında tüm yakıcı lansları 24 000 eşdeğer işletme saatinden (EOH) fazla çalışmış olmaları da değerlendirildiğinde yedek parça stokundaki yenileri ile değiştirilmiştir.



Resim 5.17. Türbin çevresel yakıcı lansları [7]

Resim 5.18’de gösterilen türbin kanat taşıyıcısı alt parçasında daha önceki bakımda üzerinde işlem yapılmış bir kilitleme deliği tespit edilmiştir. Delikte aşınma ve çapta genişleme görülmüştür. Ayrıca sızdırmazlık segmanında yanma, metal segmentlerde de korozyon tespit edilmiştir. Güçlendirilmiş çevresel borularda yapılan penetrant muayenesinde boru yüzey çatlakları tespit edilmiştir. Bakım kapsamında türbin kanat taşıyıcısı iç yüzeyleri, metal segmentler ve kilitleme pimi deliklerinde hassas kumlama ve mekanik temizleme işlemi yapılmıştır. Güçlendirilmiş borularda tespit edilen yüzey çatlakları kaynak uygulaması ile tamir edilmiştir.



Resim 5.18. Türbin kanat taşıyıcısı [7]

Resim 5.19’da gösterilen türbin 1. 2. ve 3. kademe sabit kanatlarda her iki kanat profillerinde TBC (thermal barrier coating) kaplamada hasarlar, kanat köklerinde ve peteklerde aşınma ve deformasyon, oluklarda korozyon ve oksidasyon tespit edilmiştir. İlk 3 kademe kanatlarda genellikle aynı tip hasarlar tespit edilmiştir. Bakım kapsamında 1. 2. ve 3. kademe sabit kanatların tamamı 3 set yenileriyle değiştirilmiştir.



Resim 5.19. Türbin 1. 2. 3. kademe sabit kanatları [7]

Resim 5.20’de gösterilen türbin 4. ve 5. kademe sabit kanatlarda yüksek miktarda korozyon ve oksidasyon tespit edilmiştir. Kanat kafa platformlarında sürtmeden kaynaklı hafif abrazyon, deformasyon ve aşınmalar tespit edilmiştir. Kanatların daha önceki bakımdan kaynaklı olduğu düşünülen gevşek montajı nedeniyle bu sürtmenin rotor ısı tuğla segmentlerine olduğu değerlendirilmiştir. Bakım kapsamında 4. ve 5. kademe sabit kanatların tamamı kafa platformlarındaki abrazyon ve bundan kaynaklı deformasyonlar nedeniyle 2 set yenileriyle değiştirilmiştir.



Resim 5.20. Türbin 4. ve 5. kademe sabit kanatları [7]

Resim 5.21’de gösterilen türbin stator ısı tuğlası segmentlerinde; oksidasyon, korozyon, metal yüzeylerde aşınmadan dolayı malzeme kaybı ve demontaj sırasında mekanik hasarlar tespit edilmiştir. Türbin stator ısı tuğlalarının tüm kademeleri bakım öncesinde planlandığı gibi yenileriyle değiştirilmiştir.



Resim 5.21. Türbin stator ısı tuğlası segmentleri [7]

Resim 5.22’de gösterilen türbin çıkış egzoz muhafazası üst ve alt gövde yüzeylerinde oksidasyon, korozyon, siyah yağlı kalıntılar tespit edilmiştir. Bakım kapsamında üst ve alt parça tüm iç yüzeylerde hassas temizleme yapılmıştır.



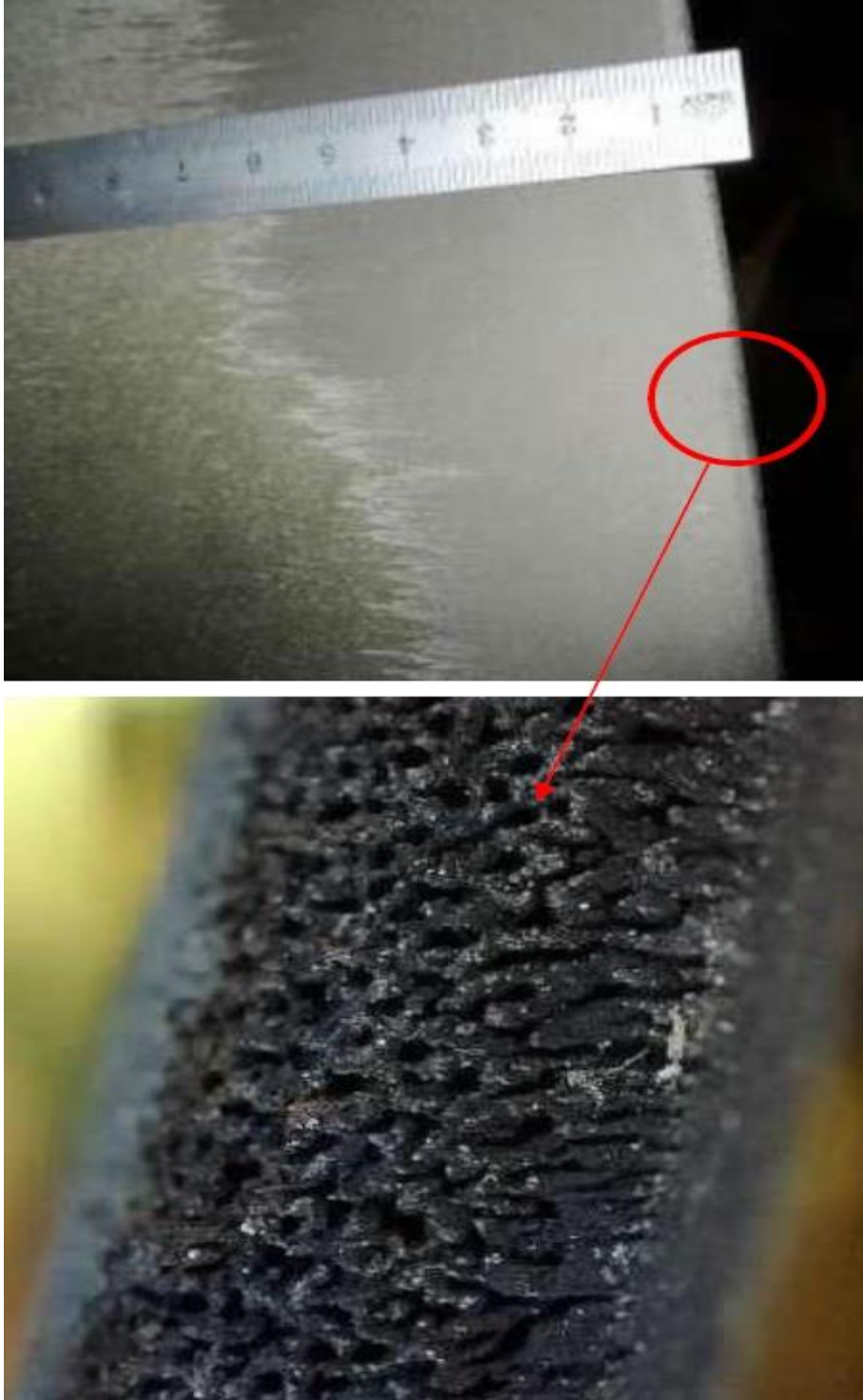
Resim 5.22. Türbin çıkış egzoz muhafazası [7]

Resim 5.23'te gösterilen türbin çıkış kompensatörü iç yüzeyinde aşırı derecede korozyon ve oksidasyon tespit edilmiştir. Sıkma civataları ve yaylarında da oksidasyon görülmüştür. Bakım kapsamında sıkma civataları ve yaylar temizlenmiştir. Kompansatör iç yüzeyinde temizleme işlemi yapılarak yüksek sıcaklığa dayanıklı astar ve üzerine boya yapılmıştır.



Resim 5.23. Türbin çıkış kompensatörü [7]

Resim 5.24'te gösterilen kompresör hareketli kanat (blade) yüzeylerinde ilk 5 kademedeki yaklaşık %15'lik yüzey alanında kaplamada erozyon ve çukurcuk korozyonu bölgeleri tespit edilmiştir. Bakım kapsamında kompresör ilk 5 kademe hareketli kanatlarda sadece temizleme işlemi yapılmıştır. Bir sonraki bakımda kanatların yenileri ile değiştirilmesi gerekmektedir.



Resim 5.24. Kompresör hareketli kanat (blade) yüzeyi [7]

Resim 5.25'te gösterilen türbin radyal yataklarından birinde aşınma, yağ ve vernik kalıntıları ile yüzeyde çatlak tespit edilmiştir. Bakım kapsamında yatak yüzeyinde yapılan temizlik ve tahribatsız muayene işlemleri neticesinde tespit edilen süreksizliklerin kabul kriterlerinin dışında olması nedeniyle yatağın kullanılmaması gerektiğine karar verilerek yenisi ile değiştirilmiştir. Türbin radyal yatağının değiştirilmesi ve şaft vibrasyonundaki (titreşim) iyileştirmeler nedeniyle yatak ve şaft vibrasyonu değerleri bakım öncesi değerlere göre daha iyi duruma getirilmiştir. Bakım öncesi ve bakım sonrası vibrasyon değerlerine ilişkin grafikler Ek-1'de yer almaktadır.



Resim 5.25. Türbin radyal yatağı [7]

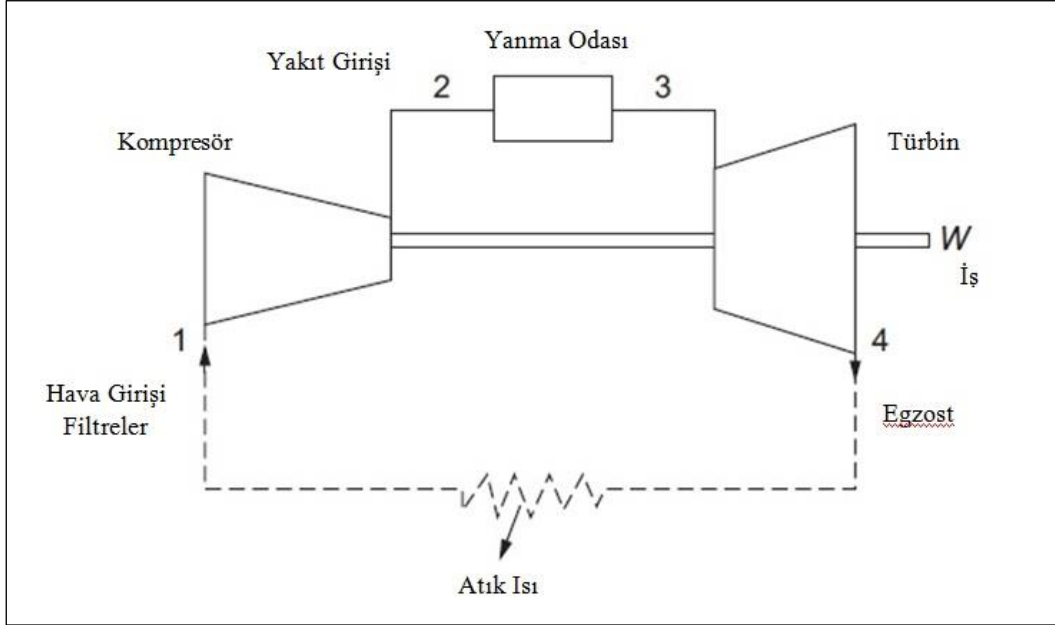
Resim 5.26'da gösterilen türbin 1. kademe hareketli kanatlarda oksidasyon, korozyon ve kanat uçlarında malzeme kaybı tespit edilmiştir. Bakım kapsamında 1. kademe hareketli kanatların tamamı yenileriyle değiştirilmiştir.



Resim 5.26. Türbin 1. kademe hareketli kanatlar (blade) [7]

6. FİLTRE DEĞİŞİMİNİN ETKİSİNE VE EKONOMİK ANALİZİNE İLİŞKİN HESAPLAMALAR

Bakım kapsamında performans analizi yapacağımız gaz türbini Şekil 6.1'de açık çevrimli bir sistem modelinde şematik olarak gösterilmiştir. Sistemin net gücü (\dot{W}_{net}), türbin gücünden (\dot{W}_T) kompresör gücünün (\dot{W}_K) çıkarılması ile hesaplanmaktadır.



Şekil 6.1. Açık çevrim bir gaz türbini şematik gösterimi [1]

Denklemler şu şekildedir:

$$h = c_p T \quad (6.1)$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_T - \dot{W}_K \quad (6.2)$$

$$\dot{W}_T = \dot{m}_g (h_3 - h_4) = \dot{m}_g (c_{pg(T3)} T_3 - c_{pg(T4)} T_4) \quad (6.3)$$

$$\dot{W}_K = \dot{m}_h (h_2 - h_1) = \dot{m}_h (c_{ph(T2)} T_2 - c_{ph(T1)} T_1) \quad (6.4)$$

h : Her bir çalışma noktasındaki entalpi (kJ/kg)

c_p : Sabit basınçta çalışma noktasındaki sıcaklıklardaki özgül ısı [kJ/(kg·K)]

T_1 : Çevre sıcaklığı (K)

T_2 : Kompresör çıkış sıcaklığı (K)

T_3 : Türbin giriş sıcaklığı (K)

T_4 : Türbin çıkış sıcaklığı (K)

\dot{m}_h : Hava debisi (kg/s)

\dot{m}_g : Gaz debisi (kg/s)

\dot{W}_T : Türbin gücü (kW)

\dot{W}_K : Kompresör gücü (kW)

\dot{W}_{net} : Net güç (kW)

Havanın ve gazların sabit basınçtaki özgül ısı kapasiteleri c_{ph} ve c_{pg} , sıcaklığın fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Denklemlerde de bu şekilde hesaplanmıştır [28].

$$c_{ph(T)} = 1,04841 - 0,000383719 T + \left(\frac{9,45378 T^2}{10^7}\right) - \left(\frac{5,49031 T^3}{10^{10}}\right) + \left(\frac{7,92981 T^4}{10^{14}}\right) \text{ [kJ/(kg}\cdot\text{K)]} \quad (6.5)$$

$$c_{pg(T)} = 0,991615 + \left(\frac{6,99703 T}{10^5}\right) + \left(\frac{2,71298 T^2}{10^7}\right) - \left(\frac{1,22442 T^3}{10^{10}}\right) \text{ [kJ/(kg}\cdot\text{K)]} \quad (6.6)$$

Kompresör çıkış sıcaklığı T_2 ve türbin çıkış sıcaklığı T_4 'ü veren denklemler şu şekildedir:

$$T_2 = T_1 \left[1 + \frac{P_{rc}^{(k_h-1)/k_h-1}}{\eta_{cis}} \right] \quad (K) \quad (6.7)$$

$$T_4 = T_3 \left[1 - \eta_{tis} \frac{1}{P_{rt}^{(k_g-1)/k_g}} \right] \quad (K) \quad (6.8)$$

Bu denklemlerde;

P_{rc} : Kompresör basınç oranı

P_{rt} : Türbin basınç oranı

k_h : Havanın özgül ısı oranı

k_g : Gazın özgül ısı oranı

η_{cis} : Kompresör izentropik verimi

η_{tis} : Türbin izentropik verimi

$$P_{rc} = \frac{P_2}{P_1} \quad (6.9)$$

$$P_3 = P_2 (1 - \varepsilon_{YO}) \quad (\text{bar}) \quad (6.10)$$

$$P_4 = P_1 (1 + \varepsilon_{\zeta}) \quad (\text{bar}) \quad (6.11)$$

$$P_{rt} = \frac{P_3}{P_4} \quad (6.12)$$

$$c_{vh(T)} = c_{ph(T)} - R_h \quad [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})] \quad (6.13)$$

$$c_{vg(T)} = c_{pg(T)} - R_g \quad [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})] \quad (6.14)$$

$$k_{h(T)} = \frac{c_{ph(T)}}{c_{vh(T)}} \quad (6.15)$$

$$k_{g(T)} = \frac{c_{pg(T)}}{c_{vg(T)}} \quad (6.16)$$

c_{vh} : Havanın sabit hacim özgül ısısı

c_{vg} : Gazın sabit hacim özgül ısısı

R_h : Havanın ideal gaz sabiti, 0,287 [kJ/(kg·K)]

R_g : Gazın ideal gaz sabiti, 0,2968 [kJ/(kg·K)]

ε_{YO} : Yanma odası basınç kayıp parametresi, 0,02

ε_{ζ} : Çıkıştaki basınç kayıp parametresi, 0,02

Gazların (\dot{m}_g) ve yakıtın (\dot{m}_y) kütleli debileri, termodinamiğin birinci kanununa göre yanma odasındaki kütle ve enerji dengesinden bulunabilmektedir [29].

$$\dot{m}_g = \dot{m}_h + \dot{m}_y \quad (\text{kg/s}) \quad (6.17)$$

$$\dot{m}_y = \dot{m}_h \left[\frac{c_{pg(T_3)} T_3 - c_{ph(T_2)} T_2}{LHV \eta_Y - c_{pg(T_3)} T_3} \right] \quad (\text{kg/s}) \quad (6.18)$$

LHV : Yakıtın alt ısı değeri, 46 286 (kJ/kg)

η_Y : Yanma verimi, 0,98

\dot{W}_{YO} : Yanma odasına verilen ısı gücü (Q_{giren})

$$\dot{W}_{YO} = \dot{m}_y LHV \eta_Y \quad (\text{kW}) \quad (6.19)$$

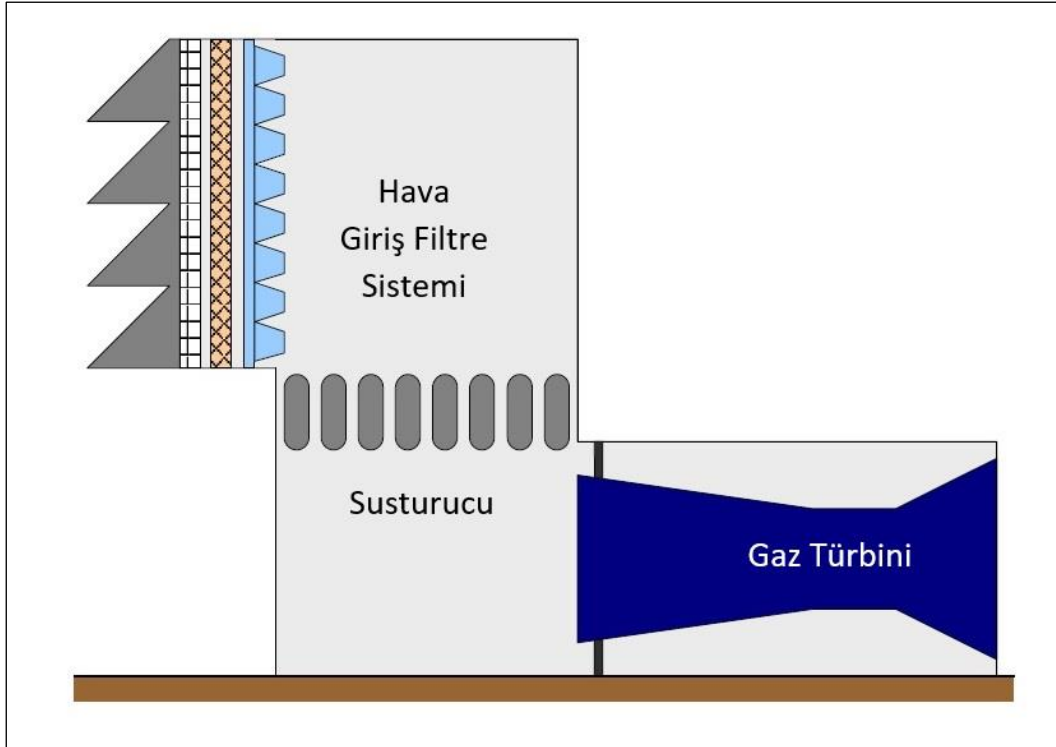
η_G : Termik verim

$$\eta_G = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{W}_{YO}} \quad (6.20)$$

HR : Türbin ısı oranı (heat rate)

$$HR = \frac{3600}{\eta_G} \quad (\text{kJ/kWh}) \quad (6.21)$$

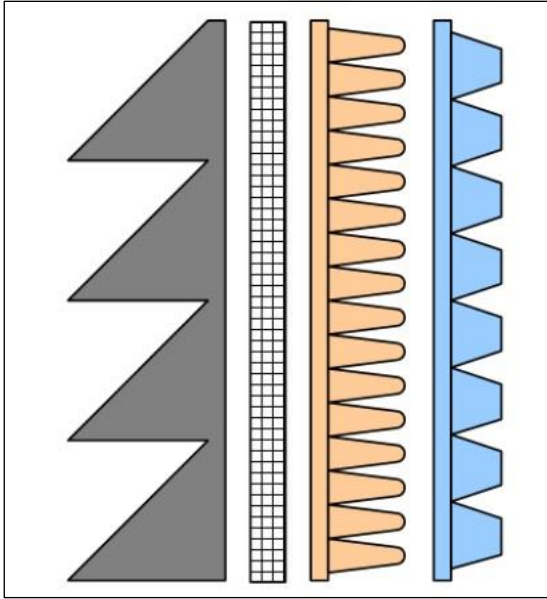
Gaz türbinlerinde hava giriş filtre sistemleri önemli bir ekipmandır. Gelişen teknoloji ile birlikte gaz türbinlerindeki filtre sistemleri kaba partiküllerin giderilmesinden, 0,01 mikrondan daha küçük parçacıklar ve sıvı partiküllerin tutulmasına kadar bir değişim göstermiştir. Gaz türbinlerinde, çalışma ortamlarına göre giriş hava filtre sistemlerinin tasarımlarının yapılması gerekmektedir. Giriş hava kalitesindeki düşüş gaz türbini çalışma performansı, çıkış gücü, verimi ve ömrü gibi birçok önemli parametreyi etkilemektedir. Ayrıca kirlenme, erozyon, korozyon gibi degradasyon faktörlerinin ortaya çıkmasına da yol açmaktadır. Şekil 6.2’de gaz türbini hava giriş filtre sisteminin konumu şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 6.2. Gaz türbini hava giriş filtre sistemi şematik gösterimi [30]

Filtre sistemleri, giriş havasının içeriğinde bulunan kirleticilerin gaz türbinine etkilerini en aza indirmek için tasarlanmıştır. Havadaki farklı kirletici türleri gaz türbini güvenilirliğini, emre amadeliliğini, bakım ve revizyon sürelerinin aralıklarını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Filtre sistemlerinin gaz türbininin içinde bulunduğu ortam koşullarına göre optimum faydayı sağlayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Gaz türbini giriş havası içeriğindeki kirleticilerin tutularak kalitesinin iyileştirilmesi gaz türbini bileşenlerinde zaman içerisinde meydana gelebilecek erozyon, korozyon, oksidasyon, kirlenme vb. degradasyon faktörlerinin oluşum sürelerini uzatarak ömrünü artırmaktadır. Bunun yanında; ihtiyaçtan fazla derecede yapılan filtrasyon işlemleri, girişte basınç kaybına, hava debisinin azalmasına, verim ve güç kaybına neden olmakla birlikte üretim maliyetlerini de artırmaktadır.

Bu çalışmada ele alınan Alstom (GE) GT13E2 tipi gaz türbinindeki filtre sisteminde Şekil 6.3'te gösterilen bir tasarım yapılmıştır.



Şekil 6.3. Gaz türbini hava giriş filtre sistemi tasarımı [30]

Şekil 6.3'te gösterilen filtre tasarımına göre; soldan sağa doğru yağmur ve kar etkisinden filtre sisteminin korunması için hava şartları koruma başlığı bulunur. Sonrasında ikinci sırada havadaki böcek, sinek, yaprak vb. uçuşan canlı veya cansız varlıkların sisteme girişini engelleyen bir perdeli süzgeç yapısı bulunur. Ardından üçüncü sırada paket tip, 8 cepli, ePMI10, %60 MIN filtre sınıfına sahip kaba ön filtre yer almaktadır. Kaba filtre, arkasında yer alan yüksek verimli ince filtrenin çok hızlı bir şekilde aşırı yüklenmesini de

önlemektedir. Son olarak ise, kaset tipi, ePMI %80 MIN filtre sınıfına sahip yüksek verimli ince filtre yer almaktadır. Bu çalışmada incelenen Alstom (GE) GT13E2 tipi gaz türbinine ait filtre sisteminde aşağıda belirtilen adetlerde ince ve kaba filtreler bulunmaktadır.

- 320 adet ince ePM1 F9 %80 MIN
- 320 adet kaba ePM10 M6 %60 MIN

Filtrelerin Teknik Özellikleri:

Çizelge 6.1. Kaba filtre teknik özellikleri [31]

Özelik	Parametre
Filtre sınıfı	ePMI10 %60 MIN
Tipi	Paket tip-8 cepli
Ölçüler	592 x 592 x 650 mm
Başlangıç basınç kaybı	65 Pa (0,65 mbar)
Son basınç kaybı	450 Pa (4,5 mbar)
Aktif filtrasyon alanı	6 m ²
Nominal debi	4250 m ³ /h
Toz tutma kapasitesi	4200 g (800 Pa'a kadar)
Yüzey hızı	3,2 m/h
Ağırlık	3,1 kg
Adeti	320 adet

Çizelge 6.2. İnce filtre teknik özellikleri [32]

Özelik	Parametre
Filtre sınıfı	ePMI1 %80 MIN F9
Tipi	Kaset tip
Ölçüler	592 x 592 x 292 mm
Başlangıç basınç kaybı	145 Pa (1,45 mbar)
Son basınç kaybı	625 Pa (6,25 mbar)
Aktif filtrasyon alanı	21 m ²
Nominal debi	4250 m ³ /h
Toz tutma kapasitesi	800 g (625 Pa'a kadar)
Ağırlık	7,6 kg
Adeti	320 adet

Filtrelerin son değişim tarihinden bu yana yaklaşık 5 yıl geçmiştir. Sahadan alınan verilerin aşığıdaki koşullarda yapılan hesaplamalar ile karşılaştırılması sonucunda elde edilen sonuçların gerçek sonuçlarla arasında yaklaşık %0,89 sapma tespit edilmiştir. Buna istinaden; hesaplamaların doğru olduğu sonucuna varılarak hava giriş filtrelerinde zaman içerisinde meydana gelen kirlenmenin basınç farkı değerlerine göre ortaya çıkan etkiler değerlendirilmiştir.

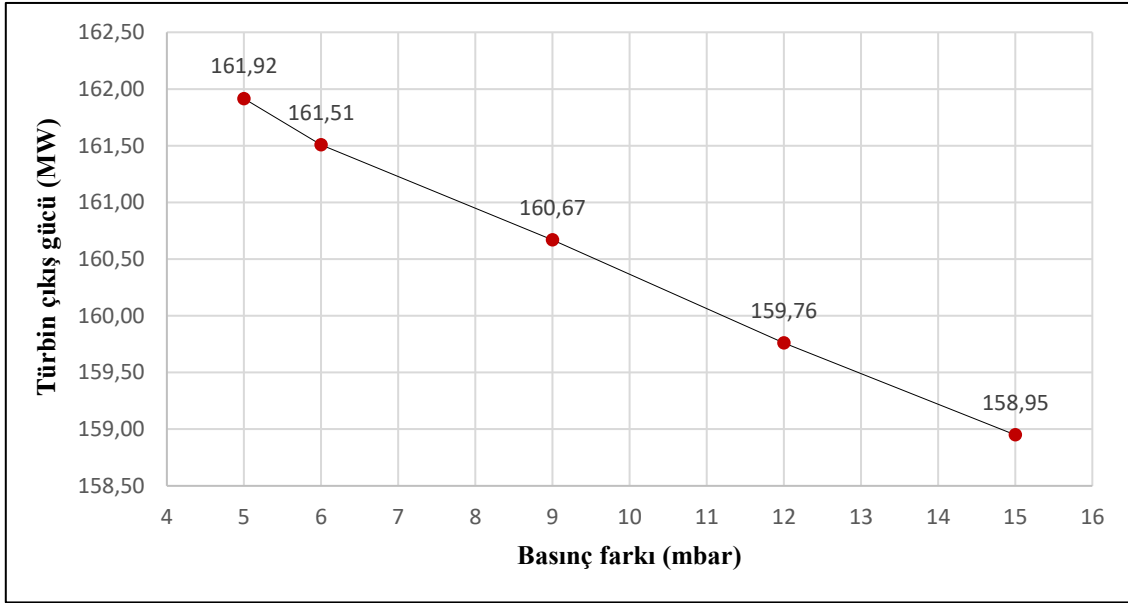
- Δp : 5 / 6 / 9 / 12 / 15 mbar
- Bağıl nem %64
- Dış ortam sıcaklığı 13 °C
- Dış ortam basıncı 1022 mbar

Filtre sistemindeki basınç farkının zamanla artması giriş havasındaki kirlenici partiküller, nem, yağ, toz vb. dış ortam şartlarından kaynaklanmaktadır. Bu durumda giriş hava debisi düşmekte ve gaz türbininin ürettiği güç de zamanla azalmaktadır. Bu güç azalmasıyla birlikte sistemin veriminde de düşüş görülmektedir.

Gaz türbinleri ile ilgili yapılan testler ve ölçümlerde literatürde; “Filtrelerin kirlenmesi nedeniyle basınç oranında meydana gelen düşüş türbin genel veriminde ve üretilen güçte önemli bir düşüşe yol açmaktadır. Giriş havasındaki basınç farkında 2,5 mbar artış yaklaşık olarak güçte %0,5 düşüşe neden olmaktadır” [1] ibaresi yer almaktadır. Bu çalışmada ele aldığımız Alstom (GE) GT13E2 tipi gaz türbinindeki filtre sistemindeki basınç farkı değerlerine göre türbin çıkış gücü değerleri ve basınç kayıp yüzdeleri Çizelge 6.3’te yer almaktadır. Ayrıca Şekil 6.4’te türbin çıkış gücünün filtrelerin yol açtığı basınç farkı ile değişimi grafiği yer almaktadır. Literatürde yer alan veri ile sahadan alınan değerlere göre yapılan hesaplamaların sonuçları birbiriyle benzerlik göstermektedir. Gaz türbinini giriş hava filtre sisteminde ilk olarak ele alınan Δp basınç farkı değeri 5 mbar’dır. Bu değerde türbinde üretilen çıkış gücü 161,92 MW olarak hesaplanmıştır. Δp değeri 15 mbar seviyesine çıktığında türbin çıkış gücü 158,95 MW olmaktadır. Basınç farkındaki 10 mbar artış türbin çıkış gücünde 2,97 MW’lık bir azalmaya yol açmaktadır. Bu değerdeki bir çıkış gücü kaybı yaklaşık %1,834 olmaktadır. Yukarıda yer alan gaz türbinleri literatüründeki test ve ölçümler sonucunda her 2,5 mbar basınç düşüşünde yaklaşık %0,5 değerine çok yakın bir değer elde edilmiştir. Bu çalışmada her 2,5 mbar basınç düşüşünde yaklaşık olarak ortalama %0,46 türbin çıkış gücünde azalma sonucuna varılmıştır.

Çizelge 6.3. Türbin çıkış gücü değerleri ve basınç kayıp yüzdeleri

Δp (mbar)	\dot{W}_{net} (MW)	Güçteki Kayıp (%)	Fark Kayıpları (%/2,5 mbar)	Ortalama Kayıp (%/2,5 mbar)
5	161,915	0	0	0,458
6	161,508	0,251	0,628	
9	160,670	0,519	0,432	
12	159,759	0,567	0,472	
15	158,949	0,507	0,422	

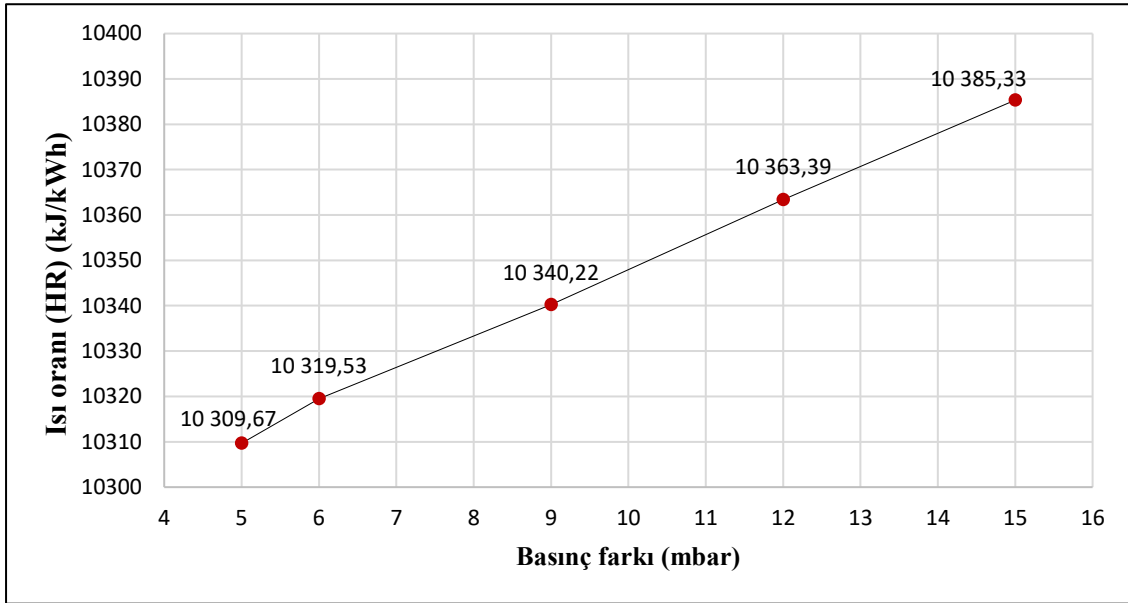


Şekil 6.4. Türbin çıkış gücünün filtrelerin yol açtığı basınç farkı ile değişimi

Filtrelerdeki basınç düşüşüne göre türbin ısı oranında meydana gelebilecek değişimlerin iki farklı literatüre göre değişik değerlerle ifade edildiği tespit edilmiştir. Bunlardan bir kaynağa göre basınç düşüşündeki 2,5 mbar artış yaklaşık olarak türbin ısı oranında %0,3 artışa neden olduğu [1], bir diğer kaynakta da %0,1 artışa neden olduğu [30] belirtilmektedir. Bu çalışmadaki gaz türbini filtre sistemindeki basınç düşüşü değerlerine göre türbin ısı oranı değerleri ve basınç kayıp yüzdeleri Çizelge 6.4'te yer almaktadır. Ayrıca Şekil 6,5'te türbin ısı oranının filtrelerin yol açtığı basınç farkı ile değişim grafiği yer almaktadır. Elde edilen veriler ve yapılan hesaplamalar sonucunda türbin ısı oranında, her 2,5 mbar basınç düşüşünde yaklaşık olarak ortalama %0,18 artış olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 6.4. Türbin ısı oranı ve basınç kayıp yüzdeleri

Δp (mbar)	Türbin Isı oranı (kJ/kWh)	Artış (%)	Fark Artışı (%/2,5 mbar)	Ortalama Artış (%/2,5 mbar)
5	10 309,668	0	0	0,183
6	10 319,527	0,096	0,239	
9	10 340,225	0,200	0,167	
12	10 363,393	0,224	0,187	
15	10 385,328	0,212	0,176	

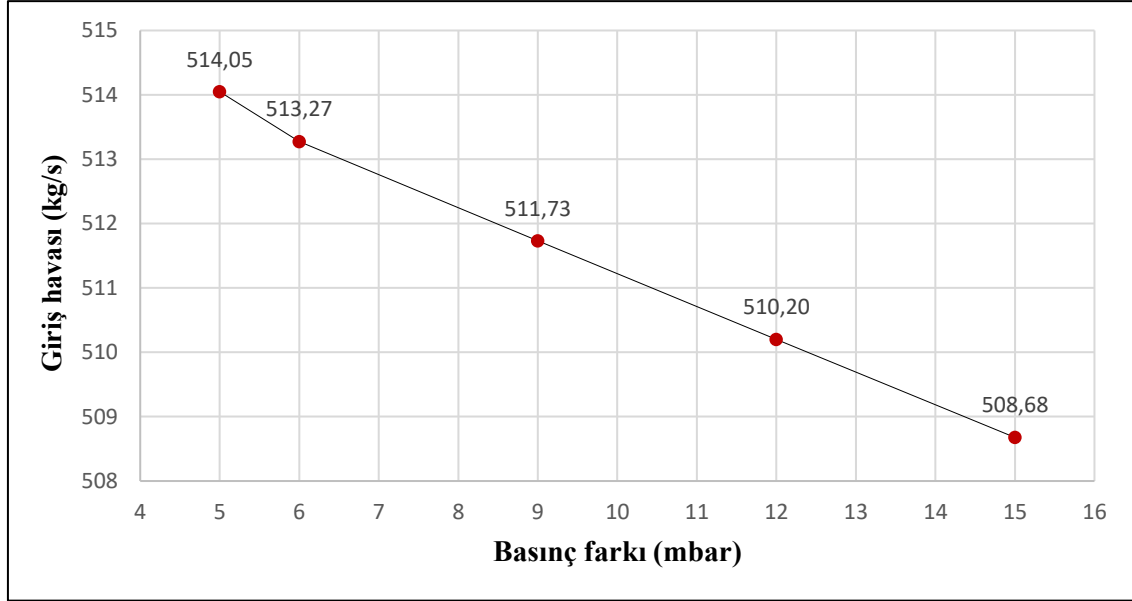


Şekil 6.5. Isı oranının filtrelerin yol açtığı basınç farkı ile değişimi

Gaz türbini giriş hava sistemindeki filtrelerde meydana gelen basınç düşüşünün giriş hava debisi ve yakıt tüketimi miktarlarına etkileri de incelenmiştir. Çizelge 6.5'te Δp değerinin 5 mbar'dan 15 mbar'a kadar artışıyla birlikte giriş hava debisinde ve sistemin veriminde düşüş gözlemlenmiştir. Giriş hava debisinin 514,048 kg/s değerinden 508,677 kg/s değerine kadar azalmasıyla birlikte yakıt tüketiminde de 9,986 kg/s değerinden 9,886 kg/s değerine doğru bir miktar düşüş ortaya çıkmıştır. Bunun yanında; sistemin genel verimi ilk etapta %34,92 olarak hesaplanmıştır. Bu değer de girişteki basınç düşüşünün 10 mbar artışı ile birlikte %34,66 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçların değişim grafikleri Şekil 6.6, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de verilmiştir.

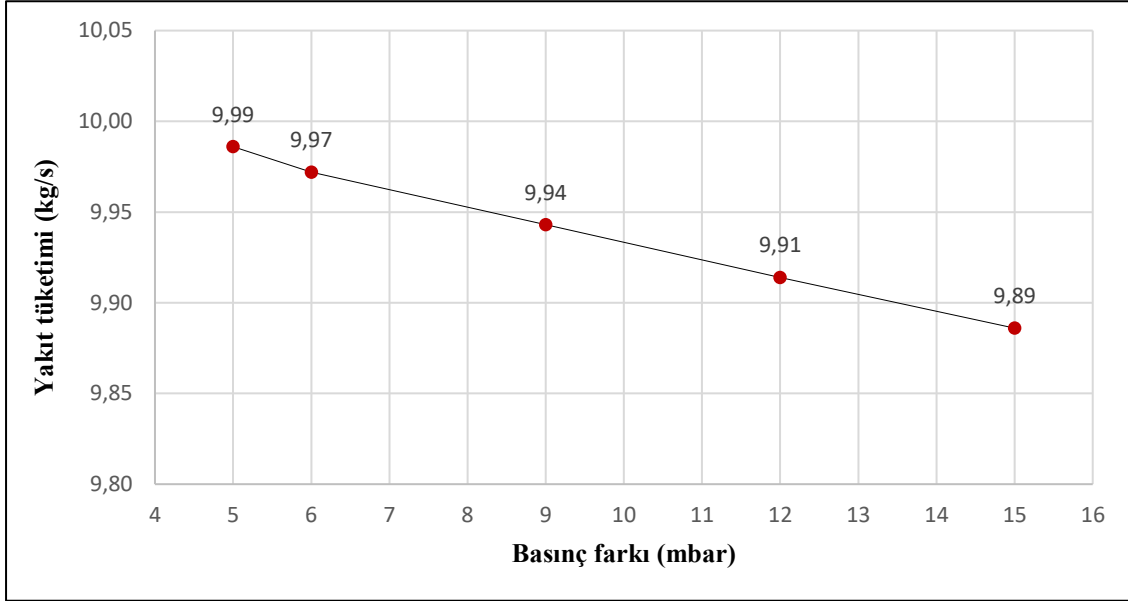
Çizelge 6.5. Basınç farkı artışı değişen değerler

Δp (mbar)	\dot{m}_h (kg/s)	\dot{m}_y (kg/s)	η_G Verim (%)	\dot{W}_{net} (MW)
5	514,048	9,986	34,92	161,92
6	513,274	9,972	34,89	161,51
9	511,732	9,943	34,82	160,67
12	510,200	9,914	34,74	159,76
15	508,677	9,886	34,66	158,95

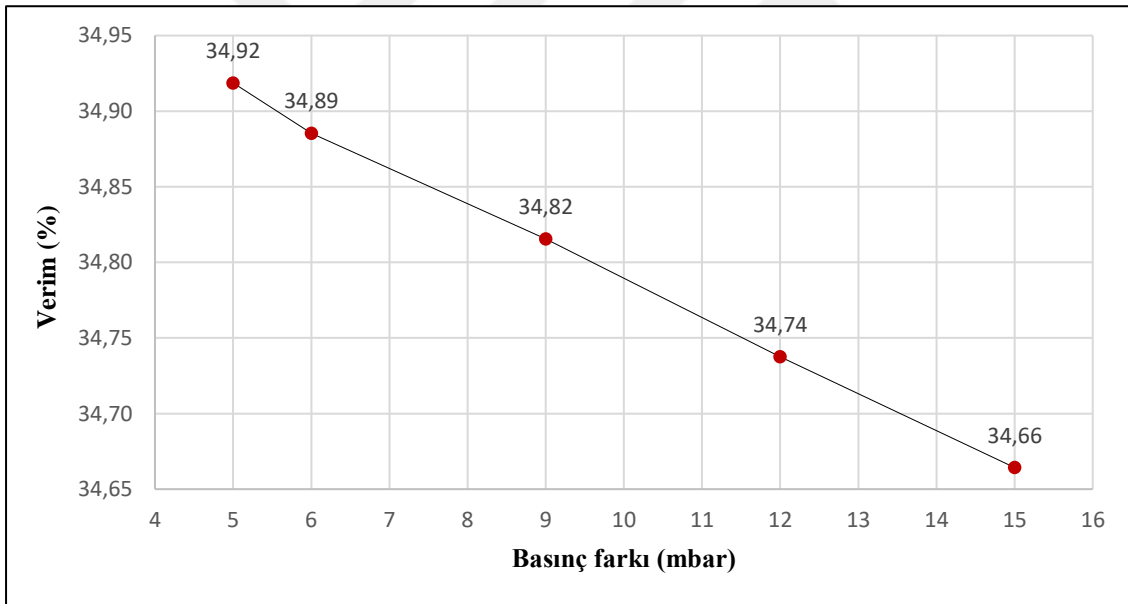


Şekil 6.6. Türbin giriş havasının filtrelerin yol açtığı basınç farkı ile değişimi

Şekil 6.6'da verilen değişim grafiğine göre türbin girişindeki basınç farkının yani basınç düşüşünün 5 mbar değerinden 15 mbar değerine kadar artmasıyla birlikte 10 mbar basınç düşüşünde türbin giriş havası yaklaşık olarak %1,045'lik bir kayba uğramıştır. Şekil 6.7'de verilen değişim grafiğinde ise tüketilen yakıt miktarı 9,986 kg/s değerinden 9,886 kg/s değerine düşmüştür. Bu yakıt miktarındaki azalma ise 10 mbar basınç düşüşünde %1,0014 oranında meydana gelmiştir. Bu değerlere göre hesaplanan genel verim ise; Şekil 6.8'de görüleceği üzere %34,92 değerinden %34,66 değerine düşmüştür. Bu durumda türbin giriş hava filtrelerindeki 10 mbar basınç düşüşü ile sistemin genel veriminde yaklaşık %0,75'lik bir düşüş olduğu hesaplanmıştır. Sonuç olarak, türbin giriş havasındaki her 1 mbar basınç düşüşü sistemin genel verimini %0,075 düşürdüğü tespit edilmiştir.

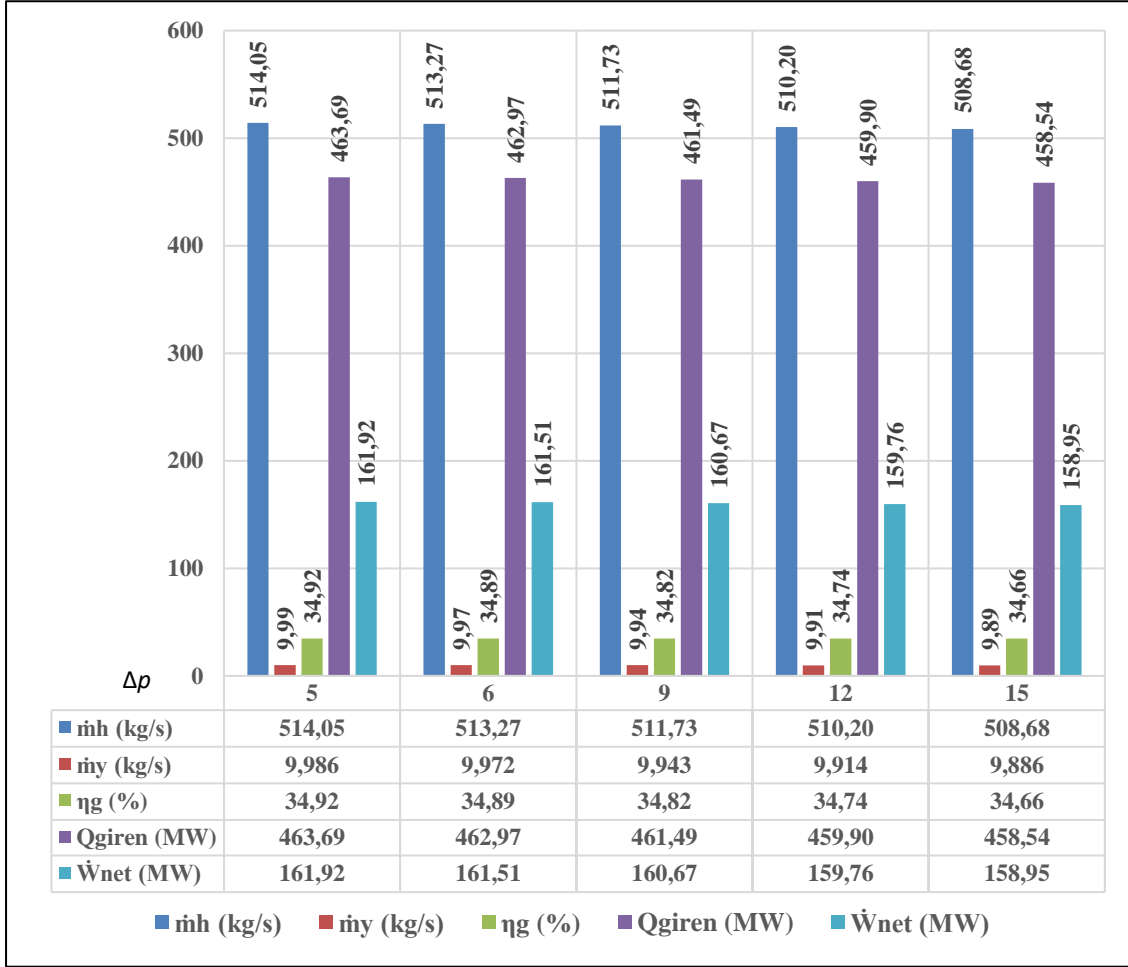


Şekil 6.7. Yakıt tüketiminin filtrelerin yol açtığı basınç farkı ile değişimi



Şekil 6.8. Türbin genel veriminin filtrelerin yol açtığı basınç farkı ile değişimi

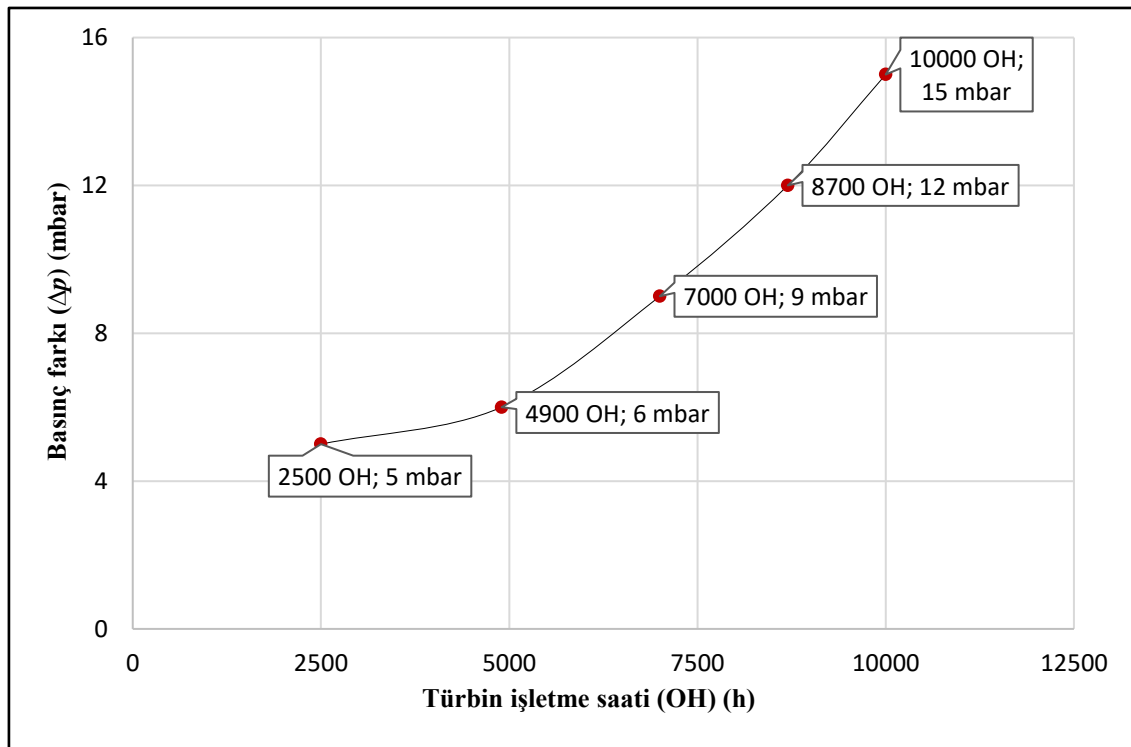
Yapılan hesaplamalara göre elde edilen tüm değerler Şekil 6.9'daki grafik ve çizelgede verilmiştir. Bu sonuçlara göre türbin giriş hava debisi, yakıt tüketimi, verimi, sisteme giren ısı ve çıkış gücüne etkileri gösterilmiştir. Bu değerlere göre gaz türbini bakımının kapsamında filtre değişiminin hangi basınç değerinde yapılmasının maliyet yönünden değerlendirilmesi de yapılacaktır.



Şekil 6.9. Türbin değerlerinin filtrelerin yol açtığı basınç farkı ile değişimi

Santralde kullanılan filtrelerin değişim periyodu için filtre üreticilerinin çeşitli önerileri bulunmaktadır. Filtre üreticileri; filtre teknik dokümantasyonunda belirtilen son basınç kaybı değerinde filtrelerin değiştirilmesinin uygun olacağını tavsiye etmektedir. Fakat bu değişim periyodunun belirlenmesi için basınç kaybı değerinin ne olacağı konusunda bir maliyet analizi yaparak analiz sonuçlarına göre değiştirmek uygulamada daha çok kullanılmaktadır. İncelemesi yapılan santralde kullanılan filtre sistemi iki aşamalıdır. Bu filtrelerden ilki pre-filtre olarak adlandırılan kaba filtre ve sonrasında yüksek verimli ince filtre kullanılmaktadır. Bu konuda yapılan literatür taramasında; iki aşamalı filtre sistemlerinde 5000 ile 10 000 işletme saati (OH) aralığında değişim yapılması tavsiye edilmektedir. Ayrıca önceden hesaplanmış bir Δp değerine çevre şartları ve santralin giriş havasının kalitesine göre eğer 3 yıl içerisinde ulaşılamıyorsa, filtrelerin bu zamanın sonunda değiştirilmesinin uygun olacağı çünkü zaman içerisinde filtrelerde yırtılma, bozulma ve bu sebeplerle işlevselliğini yitirme durumlarının ortaya çıkacağı belirtilmektedir [30].

Santralden elde edilen verilere göre filtre değişim periyotlarını çeşitli zaman dilimlerine göre değerlendirmek için öncelikle Δp artışının işletme saatine göre dağılımı belirlenmiştir. Bu konuda yapılan literatür incelemesinde; özellikle Δp değerinin filtrelerin ilk kullanımında daha düşük miktarda artış gösterdiği fakat sonraki süreçlerde filtrelerdeki kirlenme ve degradasyon etkileri nedeniyle logaritmik olarak yükseldiği görülmüştür [30]. Toplamda 10 000 OH üzerinden bir değerlendirme yapılması planlanmıştır. Bu değerlendirmeye göre Şekil 6.10'daki Δp değişim grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 6.10. Türbin işletme saatine göre basınç farkı değerlerinin değişimi

Şekil 6.10'daki grafiğe göre $\Delta p=5$ mbar'da 2500 OH, $\Delta p=6$ mbar değerinde 2400 OH, $\Delta p=9$ mbar değerinde 2100 OH, $\Delta p=12$ mbar değerinde 1700 OH ve $\Delta p=15$ mbar değerinde 1300 OH işletme saatinde toplamda 10 000 OH değerine göre hesaplamalar yapılmıştır. Santralin ürettiği elektrik enerjisinin 2024 yılı Mayıs ayı EPIAŞ verilerine göre ortalama satış fiyatı; 2250 MWh/TL alınmıştır. Doğalgaz alıő fiyatı ise BOTAŞ 2024 yılı Mayıs ayı ortalama verilerine göre; KDV ve ÖTV dahil 14,16 TL/Sm³ alınmıştır. Filtre fiyatları 2024 yılı Mayıs ayı itibariyle ince filtre için 4000 TL, kaba filtre için 1000 TL'dir. Ayrıca sistemdeki filtrelerin tamamının değişimi için 5 işçi çalıştırılarak, toplam 48 saat santralde duruş gerektiği hesaba katılarak 2024 yılı işçi çalışma ücreti toplam 250 TL/h olarak alınmıştır.

Bu verilere göre yapılan filtre değişimi odaklı gelir gider hesaplamaları çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 6.6. $\Delta p=15$ mbar, 10 000 OH filtre değişim periyodu

GELİR					Duruş Gideri (TL)	Net Gelir (TL)
Δp (mbar)	OH (h)	\dot{W}_{net} (MW)	Enerji (MWh)	Gelir (TL)		
5	2500	161,92	404 787,91	910 772 807,05	17 486 837,90	893 285 969,15
6	2400	161,51	387 619,43	872 143 707,63		872 143 707,63
9	2100	160,67	337 407,11	759 165 992,93		759 165 992,93
12	1700	159,76	271 590,53	611 078 687,56		611 078 687,56
15	1300	158,95	206 634,47	464 927 568,64		464 927 568,64
TOPLAM				3 618 088 763,80	17 486 837,90	3 600 601 925,90

GİDER				Gelir/Gider Farkı (TL)
\dot{m}_y (m ³ /s)	Yakıt (TL)	Filtre (TL)	Gider (TL)	
14,90	1 862 957 635,63	1 660 000,00	1 864 617 635,63	-3 933 665 338,38
14,88	1 820 893 153,43		1 820 893 153,43	
14,84	1 588 648 019,10		1 588 648 019,10	
14,80	1 282 297 475,82		1 282 297 475,82	
14,76	977 810 980,30		977 810 980,30	
TOPLAM	7 532 607 264,29	1 660 000,00	7 534 267 264,29	

Çizelge 6.7. $\Delta p=12$ mbar, 8700 OH filtre değişim periyodu

GELİR					Duruş Gideri (TL)	Net Gelir (TL)
Δp (mbar)	OH (h)	\dot{W}_{net} (MW)	Enerji (MWh)	Gelir (TL)		
5	2500	161,92	404 787,91	910 772 807,05	17 486 837,90	893 285 969,15
6	2400	161,51	387 619,43	872 143 707,63		872 143 707,63
9	2100	160,67	337 407,11	759 165 992,93		759 165 992,93
12	1700	159,76	271 590,53	611 078 687,56		611 078 687,56
5	1300	161,92	210 489,72	473 601 859,66	17 486 837,90	456 115 021,77
TOPLAM				3 626 763 054,83	34 973 675,79	3 591 789 379,04

GİDER				Gelir/Gider Farkı (TL)
\dot{m}_y (m ³ /s)	Yakıt (TL)	Filtre (TL)	Gider (TL)	
14,90	1 862 957 635,63	1 660 000,00	1 864 617 635,63	-3 917 559 759,69
14,88	1 820 893 153,43		1 820 893 153,43	
14,84	1 588 648 019,10		1 588 648 019,10	
14,80	1 282 297 475,82		1 282 297 475,82	
14,90	951 232 854,73	1 660 000,00	952 892 854,73	
TOPLAM	7 506 029 138,72	3 320 000,00	7 509 349 138,72	

Çizelge 6.8. $\Delta p=9$ mbar, 7000 OH filtre değişim periyodu

GELİR					Duruş Gideri (TL)	Net Gelir (TL)
Δp (mbar)	OH (h)	\dot{W}_{net} (MW)	Enerji (MWh)	Gelir (TL)		
5	2500	161,92	404 787,91	910 772 807,05	17 486 837,90	893 285 969,15
6	2400	161,51	387 619,43	872 143 707,63		872 143 707,63
9	2100	160,67	337 407,11	759 165 992,93		759 165 992,93
5	2500	161,92	404 787,91	910 772 807,05	17 486 837,90	893 285 969,15
6	500	161,51	80 754,05	181 696 605,76		181 696 605,76
TOPLAM				3 634 551 920,41	34 973 675,79	3 599 578 244,62

GİDER				Gelir/Gider Farkı (TL)
\dot{m}_y (m ³ /s)	Yakıt (TL)	Filtre (TL)	Gider (TL)	
14,90	1 862 957 635,63	1 660 000,00	1 864 617 635,63	-3 918 550 939,48
14,88	1 820 893 153,43		1 820 893 153,43	
14,84	1 588 648 019,10		1 588 648 019,10	
14,90	1 862 957 635,63	1 660 000,00	1 864 617 635,63	
14,88	379 352 740,30		379 352 740,30	
TOPLAM	7 514 809 184,10	3 320 000,00	7 518 129 184,10	

Çizelge 6.9. $\Delta p=6$ mbar, 4900 OH filtre değişim periyodu

GELİR					Duruş Gideri (TL)	Net Gelir (TL)
Δp (mbar)	OH (h)	\dot{W}_{net} (MW)	Enerji (MWh)	Gelir (TL)		
5	2500	161,92	404 787,91	910 772 807,05	17 486 837,90	893 285 969,15
6	2400	161,51	387 619,43	872 143 707,63		872 143 707,63
5	2500	161,92	404 787,91	910 772 807,05	17 486 837,90	893 285 969,15
6	2400	161,51	387 619,43	872 143 707,63		872 143 707,63
5	200	161,92	32 383,03	72 861 824,56	17 486 837,90	55 374 986,67
TOPLAM				3 638 694 853,91	52 460 513,69	3 586 234 340,23

GİDER				Gelir/Gider Farkı (TL)
\dot{m}_y (m ³ /s)	Yakıt (TL)	Filtre (TL)	Gider (TL)	
14,90	1 862 957 635,63	1 660 000,00	1 864 617 635,63	-3 901 932 376,81
14,88	1 820 893 153,43		1 820 893 153,43	
14,90	1 862 957 635,63	1 660 000,00	1 864 617 635,63	
14,88	1 820 893 153,43		1 820 893 153,43	
14,90	115 485 138,91	1 660 000,00	117 145 138,91	
TOPLAM	7 483 186 717,04	4 980 000,00	7 488 166 717,04	

Çizelge 6.10. $\Delta p=5$ mbar, 2500 OH filtre değişim periyodu

GELİR					Duruş Gideri (TL)	Net Gelir (TL)
Δp (mbar)	OH (h)	\dot{W}_{net} (MW)	Enerji (MWh)	Gelir (TL)		
5	2500	161,92	404 787,91	910 772 807,05	17 486 837,90	893 285 969,15
5	2500	161,92	404 787,91	910 772 807,05	17 486 837,90	893 285 969,15
5	2500	161,92	404 787,91	910 772 807,05	17 486 837,90	893 285 969,15
5	2500	161,92	404 787,91	910 772 807,05	17 486 837,90	893 285 969,15
TOPLAM				3 643 091 228,18	69 947 351,58	3 573 143 876,60

GİDER				Gelir/Gider Farkı (TL)
\dot{m}_y (m ³ /s)	Yakıt (TL)	Filtre (TL)	Gider (TL)	
14,90	1 862 957 635,63	1 660 000,00	1 864 617 635,63	-3 885 326 665,92
14,90	1 862 957 635,63	1 660 000,00	1 864 617 635,63	
14,90	1 862 957 635,63	1 660 000,00	1 864 617 635,63	
14,90	1 862 957 635,63	1 660 000,00	1 864 617 635,63	
TOPLAM	7 451 830 542,52	6 640 000,00	7 458 470 542,52	

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elektrik üretiminde ve kojenerasyon sistemlerinde kullanımı oldukça yaygın olan gaz türbinlerinin, gelişen ekonomi ve sanayi ile birlikte günümüzde devamlı artmakta olan enerji talebinin karşılanması için sürdürülebilir bir şekilde işletilmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda enerji arz güvenliğini sağlamak amacıyla, elektrik üreten tesislerde sürekli ve belirli performans değerlerinde kesintisiz ve kaliteli bir enerji sağlamak için gaz türbinlerinin periyodik bakımlarının özenle, yeterli teknik donanım ve kalifiye personelle, sistemin ihtiyaç duyduğu zamanda, belirli bir plan çerçevesinde yapılması gerekmektedir. Yapılan periyodik bakımlar sonucunda gaz türbinlerinin sürdürülebilir çalışma koşulları ve istenilen performans değerlerinde kesintisiz enerji üretimlerinin sağlanması büyük oranda güvence altına alınmaktadır.

Bu çalışmada; EÜAŞ Tekirdağ Doğalgaz Kombine Çevrim A Santralindeki, 1996 yılında imal edilmiş olan Alstom (GE) GT13E2 model, çevresel yanma odalı, NO_x kontrollü, çoklu yakıclı (72 adet) ve çift yakıtı uygun bir gaz türbininin 8. C tipi (combustion) bakımı incelenmiştir. Bakım kapsamında gaz türbininde sahada yapılan işlemler, elde edilen bulgular ve bu bulgulara yönelik uygulanan iyileştirme çalışmaları hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca gaz türbinlerinde özellikle türbin giriş havasından kaynaklanan, filtre sisteminde meydana gelen kirlenmenin sistem performansına etkileri incelenerek filtre değişim periyotlarının maliyet analizi yapılmıştır. Türbin giriş havası filtre sistemindeki basınç farkının türbin işletme saatine göre değişim profili oluşturularak, bu değişimin türbin giriş hava debisi, çıkış gücü, ısı oranı, yakıt tüketimi ve verim üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sahadan alınan verilerle yapılan hesaplamalara göre elde edilen sonuçlarla aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır.

- Gaz türbini giriş havasındaki basınç farkının 5 mbar değerinden 15 mbar değerine kadar artmasıyla birlikte yani, 10 mbar'lık basınç düşüşünde türbin giriş havasında yaklaşık olarak %1,045'lik bir kayıp tespit edilmiştir. Böylece, her 2,5 mbar basınç düşüşünde giriş hava debisinde yaklaşık olarak %0,26 azalma sonucuna varılmıştır.
- Gaz türbini giriş havasındaki her 2,5 mbar basınç düşüşünde türbin çıkış gücünde yaklaşık olarak %0,46 azalma tespit edilmiştir.
- Gaz türbini ısı oranında, her 2,5 mbar basınç düşüşünde yaklaşık olarak %0,18 artış olduğu sonucuna varılmıştır.

- Gaz türbininde tüketilen yakıt miktarındaki azalma ise 10 mbar basınç düşüşünde %1,0014 oranında meydana gelmiştir. Böylece, her 2,5 mbar basınç düşüşü için yakıt tüketiminde yaklaşık olarak %0,25 azalma sonucuna varılmıştır.
- Bu değerlere göre hesaplanan genel verim ise; %34,92 değerinden %34,66 değerine düşmüştür. Bu durumda türbin giriş hava filtrelerindeki 10 mbar'lık basınç düşüşü ile sistemin genel veriminde yaklaşık %0,75'lik bir düşüş olduğu hesaplanmıştır. Sonuç olarak, türbin giriş havasındaki her 2,5 mbar basınç düşüşünün sistemin genel verimini yaklaşık olarak %0,19 düşürdüğü tespit edilmiştir.

Türbin giriş havasındaki basınç farkının artmasıyla birlikte türbin çıkış gücü ve yakıt tüketim miktarlarındaki değişimlere göre filtre değişim periyotlarının filtre maliyetleri, duruş süreleri ve değişim işçilikleri hesaplanarak yapılan analizlerine göre günümüz koşullarında yakıt maliyetinin yüksekliği ve elektrik satış fiyatının nispeten düşük olması nedeniyle gelir gider arasındaki fark eksi çıkmaktadır. Fakat mevcut durumda ve belirlenen koşullarda yapılan maliyet analizine göre santralin giriş hava filtrelerinin değişiminin, $\Delta p=5$ mbar değerine ulaştığında ve yaklaşık olarak her 2500 işletme saati (OH) aralığında yapılması optimum seçenek olarak gözükmektedir. Sahada uygulanan 8. C tipi bakım kapsamında, ince filtreler yaklaşık 5 yıldır kullanıldığından çeşitli deformasyonlara uğramış olması nedeniyle değiştirilmiştir. Kaba filtreler işlevini yerine getirdiğinden dolayı değiştirilmemiştir. Kaba filtrelerin de 2500 işletme saati (OH) sonrasında Δp değerlerine de bakılarak değiştirilmesi uygun olacaktır. Gaz türbini sistemine giren havanın kalitesi basınç farkı değişim profilini etkilemektedir. Bu çalışmada ele alınan değişim profili türbinin içerisinde bulunduğu dış ortam şartları ve sahadan elde edilen bilgilere göre oluşturulmuştur. Filtre değişiminin uygun zamanda yapılması gaz türbininin asgari düzeyde güç kaybı yaşamasına ve bakım kapsamında tespit edilen korozyon, erozyon, oksidasyon vb. degradasyon faktörlerinden en az düzeyde etkilenerek daha yüksek performansta çalışmasına olanak sağlayacaktır. Ayrıca bakım kapsamında ünitenin kompresöründe meydana gelen korozyon, erozyon, oksidasyon vb. degradasyon faktörlerinden temizleme yoluyla kısmen arındırılması, gaz türbini tüm kademe kanatlarının yenileri ile değiştirilmesi ve türbin yatak değişimi ile Ek-1'de verilen yatak ve shaft vibrasyonlarındaki iyileştirmeler sonucunda santralin emre amadelik ve güvenilirliğinde önemli bir artış sağlanacağı değerlendirilmektedir. Bunun tespiti ise bir sonraki bakıma kadar geçen süredeki ünitenin emre amadelik ve çalışma istatistikleri ile ancak yapılabilecektir.

KAYNAKLAR

1. Boyce, Meherwan P. (2012). *Gas Turbine Engineering Handbook*. (Fourth Edition). Waltham: Butterworth-Heinemann.
2. Meher-Homji, Cyrus B. (2000). *The historical evolution of turbomachinery*. Proceedings of the 29th Turbomachinery Symposium, Texas, 281-322.
3. Suyambazhahan, S. (2016). *Power Plant Engineering*. (First Edition). New Delhi: Laxmi Publications Pvt Ltd.
4. Cilindro, A. (2015). *Performance analysis and economic effects of maintenance and hot gas path inspection of a combined cycle power plant*. Master Thesis, Università degli studi della Campania Luigi Vanvitelli, Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione, Caserta.
5. İnternet: Alstom GT13E2 gas turbine information documentation. (2003).
Web:<https://www.scribd.com/document/411248140/GT13E2-General-Data-pdf> Son Erişim Tarihi: 15.06.2024
6. Kurz, R., Meher-Homji, C., Brun K., Moore J., Gonzalez F. (2013, October 1-3). *Gas turbine performance and maintenance*, Proceedings of the Forty-Second Turbomachinery Symposium, Houston, Texas, US.
7. Tuğran Enerji A.Ş. (2023). EÜAŞ Tekirdağ Combined Cycle Power Plant (A) GT13E2 8th C-inspection Report. Tekirdağ.
8. Kurz, R., Brun K. (May 2000). *Degradation in gas turbine systems*, Conference Paper in Journal of Engineering for Gas Turbines and Power.
9. Tejedor, T. A., Singh, R., Pilidis P. (2013). Maintenance and repair of gas turbine components. *Modern gas turbine systems, high efficiency, low emission, fuel flexible power generation, Woodhead Publishing Series in Energy*, 20, Chapter 13.
10. Kappis, W. (2013). Compressors in gas turbine systems. *Modern gas turbine systems, high efficiency, low emission, fuel flexible power generation, Woodhead Publishing Series in Energy*, 20, Chapter 4.
11. Kurz, R., Brun, K. (2001). Degradation in gas turbine systems, *Transactions of the ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 123(1), 70-77.
12. Loud, L. A. A. S. (1991). Gas turbine inlet air treatment. *General Electric Company*. Schenectady, New York.
13. Diakunchak I. S. (1992, April). Performance degradation in industrial gas turbine. *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 114(2), 161-168.

14. Bromley, A. F., Meher, C. B. (2004). Gain a competitive edge with a better understanding of GT compressor fouling, washing. *Combined Cycle Journal*, Fourth Quarter, 37-41.
15. Sugliano, R. (2010). *Techno economic analysis of different filter systems in combination with compressor cleaning*. M.Sc. Thesis, Cranfield University.
16. Mund, F. C., Pilidis, P. (2006). Gas turbine compressor washing: historical developments, trends and main design parameters for online systems. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 128(2), 344-353.
17. Mund, F. C. (2006). *Coordinated application of CFD and gas turbine performance methods*. Ph.D. Thesis, Cranfield University.
18. Brun, K., Kurz, R. (2010). Turbo myth busters. *Turbomachinery International*, 51(2), 40.
19. Kurz, R., Meher-Homji, C., Brun, K. (2014, September 23-25). *Gas turbine degradation*. 43rd Turbomachinery & 30th Pump Users' Symposia (Pump & Turbo 2014), Houston, TX.
20. Schnieder, M., Sommer, T. (2013). Turbines for industrial gas turbine systems. *Modern gas turbine systems, high efficiency, low emission, fuel flexible power generation, Woodhead Publishing Series in Energy*, 20, Chapter 6.
21. Brun, K., Kurz, R. (2019). Introduction to Gas Turbine Theory. (3rd Edition). *Solar Turbines, A Caterpillar Company*.
22. Kurz, R., Brun, K. (2007). *Gas turbine tutorial-maintenance and operating practices effects on degradation and life*. Proceedings of the 36th Turbomachinery Symposium, Houston, TX.
23. Meher-Homji, C. B., Bromley, A. F. (2010). *Gas turbine fuels-system design, combustion and operability*. Proceedings of the 39th Turbomachinery Symposium, Houston, TX.
24. ISO 3977-9:1999, (1999). *Gas turbines – Procurement – Part 9: Reliability, availability, maintainability and safety standard*.
25. Knorr, R. H., Jarvis, G. (1975). Maintenance of industrial gas turbines. ASME Publication 75-GT-93. *General Electric Company*. Schenectady, New York.
26. Gülen, S. C. (2020). *Gas Turbine Combined Cycle Power Plants*. Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group.

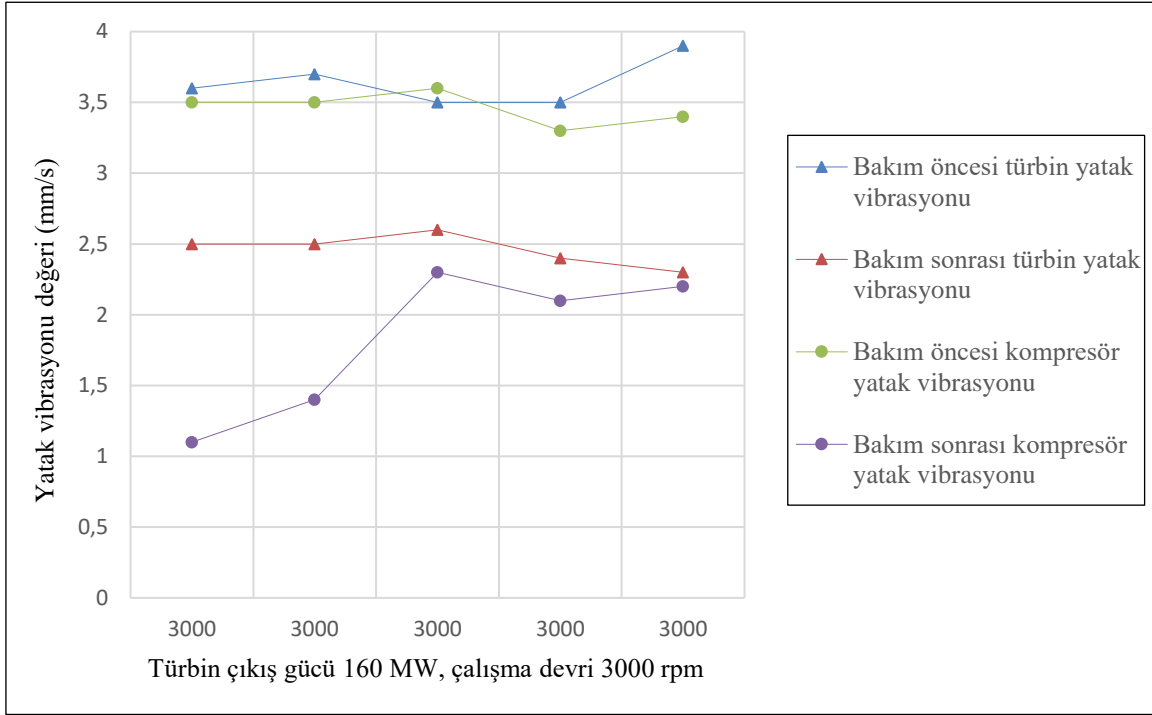
27. Beagle, D., Moran, B., McDufford, M., Merine, M. (2021). GER-3620P(01/21) Heavy-duty gas turbine operating and maintenance considerations. *GE Power*. Atlanta, GA.
28. Çetin, B. (2005). *Çok amaçlı enerji üretim sistemlerinin termoekonomik optimizasyonu*. Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
29. Çetin, B. (2006). Gaz türbinlerinin optimal performans analizi. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 7(1) 59-71.
30. Wilcox, M., Baldwin, R., Garcia-Hernandez, A., Brun, K. (2010, April) *Guideline for gas turbine inlet air filtration systems. Release 1.0*. Gas Machinery Research Council, Southwest Research Institute.
31. Freudenberg Filtration Technologies Product Catalog International. (2024). *Compact pocket filter T 60 T 60 1/1 8L Viledon*.
32. Freudenberg Filtration Technologies Product Catalog International. (2024). *Maxipleat cassette filters box type series, MX 98 R-D Viledon*.



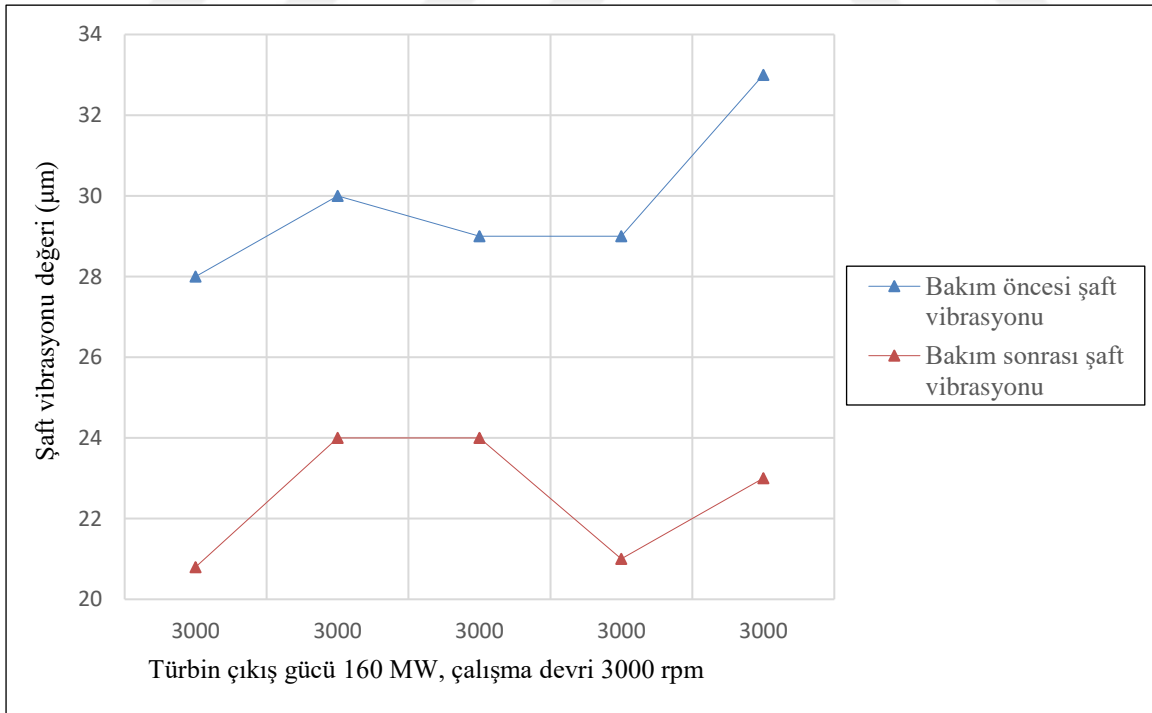


EKLER

EK-1. Gaz türbini bakımı öncesi ve sonrasında yatak ve şaft vibrasyonu değerleri



Şekil 1.1. Gaz türbini bakımı öncesi ve sonrasında yatak vibrasyonu değişimi



Şekil 1.2. Gaz türbini bakımı öncesi ve sonrasında şaft vibrasyonu değişimi



Gazili olmak ayrıcalıktır