



GAZ TÜRBİNİ PERİYODİK BAKIMLARININ SİSTEM PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Orhan Özay KÖSE¹, M. Zeki YILMAZOĞLU^{2*}

¹ TEMSAN Türkiye Elektromekanik San. A.Ş., Ankara
ORCID No : <http://orcid.org/0009-0004-9110-5066>

¹ Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Müh. Böl., Ankara
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-7874-768X>

Anahtar Kelimeler

Öz

Gaz türbini, periyodik bakım, muayene, sistem performansı, hava giriş filtresi

Gaz türbinlerinin sürdürülebilir bir şekilde işletilmesi için periyodik bakımlarının zamanında yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, Alstom (GE) GT13E2 1996 model bir gaz türbininin 8. C tipi (combustion) bakımı incelenmiştir. Bakım kapsamında yapılan işlemler, elde edilen bulgular ve iyileştirmeler hakkında bilgi verilmiştir. Türbin giriş havası filtre sistemindeki kirlenmenin sistem çalışma performansına etkileri incelenerek filtre değişim periyotlarının maliyet analizi yapılmıştır. Türbin giriş havası filtre sistemindeki basınç farkının (Δp) türbin işletme saatine (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. Elde edilen veriler ve yapılan hesaplamalara göre her 2,5 mbar basınç düşüşünde giriş hava debisinde %0,26 azalma, yakıt tüketiminde %0,25 azalma, türbin çıkış gücünde %0,46 azalma, ısı oranında %0,18 artış ve sistemin genel veriminde %0,19 düşüş olduğu sonucuna varılmıştır. 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.

* zekiyilmazoglu@gazi.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1564458

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

Keywords

Gas turbine, periodic maintenance, inspection, system performance, air inlet filter

Abstract

Gas turbines require periodic maintenance on time for sustainable operation. In this study, the 8th C-type (combustion) maintenance of an Alstom (GE) GT13E2 1996 model gas turbine is investigated. The operations performed during the maintenance, findings, and improvements are summarized. The effect of blockage due to contamination in the turbine inlet air filter system on the operating performance of the system is examined and the cost analysis of the filter replacement periods is carried out. 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. According to the data obtained, it was concluded that for every 2.5 mbar pressure drop there is 0.26% decrease in inlet air flow rate, 0.25% decrease in fuel consumption, 0.46% decrease in turbine output power, 0.18% increase in heat rate and 0.19% decrease in overall efficiency of the system. 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.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 11.10.2024

Kabul Tarihi : 26.11.2024

Research Article

Submission Date : 11.10.2024

Accepted Date : 26.11.2024

Extended Abstract

Introduction

Gas turbines are widely used in electricity generation and cogeneration systems. Today, energy demand is increasing gradually with the developing economy and industry, which greatly increases the importance of energy supply security. To ensure energy supply security, it is important to conduct periodic maintenance of gas turbines used to provide uninterrupted and quality energy at continuous and certain performance values in electricity generating facilities on time. The periodic maintenance should be conducted 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 and efficiency values are largely ensured. The development of gas turbines and their increased efficiency also provide benefits in terms of environmental impacts. Efficiency improvements in basic terms mean less fuel and more energy at a lower cost. In addition, the reduction in fuel consumption contributes to the reduction of greenhouse gas effects by releasing less emissions into the environment, thus reducing the negative impacts on the environment.

Objectives and Research Purpose

In this study, basic information about gas turbines, their classification, and the important components that constitute the gas turbine system are given. In addition, the degradation factors that occur in gas turbines due to various reasons and the effects of degradation factors on gas turbine components are examined. To minimize the effects of degradation factors, the periodic maintenance performed to minimize the effects of degradation factors, maintenance methods, determination of the intervals used in the implementation of maintenance, which operations are performed within the scope of maintenance, and the findings and degradation factors encountered in the maintenance operations performed in a gas turbine combined cycle power plant installed in Türkiye are discussed. In addition, the effects of the pressure drop in the inlet air as a result of the contamination of the filters over time on the gas turbine inlet air flow rate, fuel consumption, output power, heat rate, and efficiency are evaluated and the results obtained with the field data are analyzed in terms of filter replacement period and cost. Although there are many studies on gas turbines, there is no study focused on the effects of periodic maintenance, the findings that occur within the scope of maintenance and the pressure drop effects in the inlet air as a result of the contamination. In addition, this study aims to contribute to the continuous and sustainable operation of the power plants, which have an important place in the energy production of our country, at the desired performance and efficiency values by providing basic information about gas turbines to the sector shareholders who operate and maintain the gas turbine power plants installed in Türkiye.

Methodology

In this study, the 8th C-type (combustion) maintenance of an Alstom (GE) GT13E2 1996 model gas turbine is investigated. The operations performed during the maintenance, findings, and improvements are summarized. The effects of contamination in the turbine inlet air filter system on the operating performance of the system are

examined and the cost analysis of the filter replacement periods is made. By profiling the variation of the differential pressure (Δ_p) 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.

Results and Conclusions

According to the data obtained and calculations made, with an increase in the differential pressure in the gas turbine inlet air from 5 mbar to 15 mbar, a pressure drop of 10 mbar, a loss of approximately 1.045% in the turbine inlet air is observed. Thus, it is concluded that for every 2.5 mbar pressure drop, the inlet air flow rate decreases by approximately 0.26%. For every 2.5 mbar pressure drop in the gas turbine inlet air, the turbine output power decreases by approximately 0.46%. It is concluded that for every 2.5 mbar pressure drop, the gas turbine heat rate increases by approximately 0.18%. The reduction in the amount of fuel consumed in the gas turbine is 1.0014% at a pressure drop of 10 mbar. Thus, it is concluded that for every 2.5 mbar pressure drop, fuel consumption decreases by approximately 0.25%. The overall efficiency calculated according to these values decreased from 34.92% to 34.66%. In this case, it is calculated that there is a decrease of approximately 0.75% in the overall efficiency of the system with a pressure drop of 10 mbar in the turbine inlet air filters. As a result, it is determined that every 2.5 mbar pressure drop in the turbine inlet air decreases the overall efficiency of the system by approximately 0.19%.

According to the analysis made by calculating the filter replacement periods, filter costs, shutdown times and replacement labor according to the changes in the output power and fuel consumption amounts with the increase in the differential pressure in the turbine inlet air, the difference between income and expenditure is negative due to the high fuel costs and relatively low electricity sales price in today's conditions. In two-stage filter systems, it is recommended to change the filter between 5000 and 10 000 operating hours (OH). However, according to the cost analysis based on the current situation with current prices, it seems to be the optimum option to replace the inlet air filters of the power plant when $\Delta p=5$ mbar and approximately every 2500 OH operating hours.

The quality of the air entering the gas turbine system affects the pressure difference variation profile. The variation profile considered in this study is based on the ambient conditions in which the turbine is located and the information obtained from the field. Performing the filter replacement at the appropriate time will allow the gas turbine to operate at higher performance with minimum power loss and minimized degradation factors such as corrosion, erosion, oxidation, etc. identified within the scope of maintenance.

In addition, it is evaluated that a significant increase in the availability and reliability of the power plant will be achieved as a result of the improvements in bearing and shaft vibrations with turbine bearing replacement, the partial cleaning of the unit from degradation factors such as corrosion, erosion, oxidation, etc. occurring in the compressor and replacement of all stages of turbine blades with new ones. This can only be determined by the availability and operation statistics of the unit during the period until the next maintenance.

1. Giriş

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, gaz türbinleri, gaz türbini bileşenleri ve gaz türbinlerinin sınıflandırılması 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 kapsamlarında 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 ömürleri ile çıkış gücü, verim, ısı

oranı ve yakıt tüketimi değerlerine etki eden türbin giriş havasındaki basınç farkı artışı ile 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 sağlayarak, 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 Türbinleri

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. Basınç 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 (Boyce, 2012). Ancak, verimlilikteki artışın emre amadelikte bir düşüşe yol açmamasına dikkat edilmelidir.

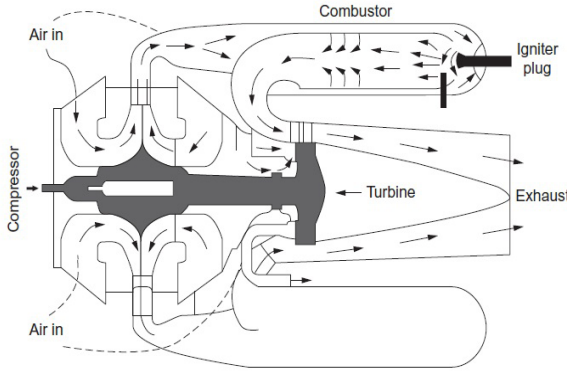
Bir buhar santralının kurulumundan üretime kadar geçen süre yaklaşık 42 ile 60 ay arasında iken, kombine çevrim gaz türbin santralleri için bu süre yaklaşık 22 ile 36 ay arasındadır. Kombine çevrim gaz türbin santrallerinde inşaat süresi yaklaşık 18 ay iken, çevre izinlerinin alınması çoğu durumda 12 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 (Boyce, 2012).

Günümüzün modern gaz türbininin babası olarak birçok kişi Frank Whittle'ı 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 1'de Whittle türbininin bir fotoğrafı ve Şekil 1'de 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 (Meher-Homji, 2000).



Resim 1. Whittle Türbini (Meher-Homji, 2000)



Şekil 1. Whittle Türbini Şematik Diyagramı (Meher-Homji, 2000)

Günümüzde ise gaz türbinlerinin birçok farklı verimlilik artırıcı uygulamalar 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.

2.1 Gaz Türbinlerinin Sınıflandırılması

Gaz türbinlerinin kullanım alanları ve güçlerine göre sınıflandırılması şu şekildedir (Boyce, 2012).

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.

2. Uçak türevi (aeroderivatif) gaz türbinleri

Aeroderivatifler, adından da anlaşılacağı gibi uçakların ana taşıyıcısı olarak havacılık endüstrisinde ortaya çıkan güç üretim üniteleridir. Güçleri yaklaşık 2,5 ila 50 MW arasında değişmektedir. Bu ünitelerin verimlilikleri %35 ila %45 arasında değişmektedir.

3. Endüstriyel tip gaz türbinleri

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

4. 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.

5. Mikro türbinler

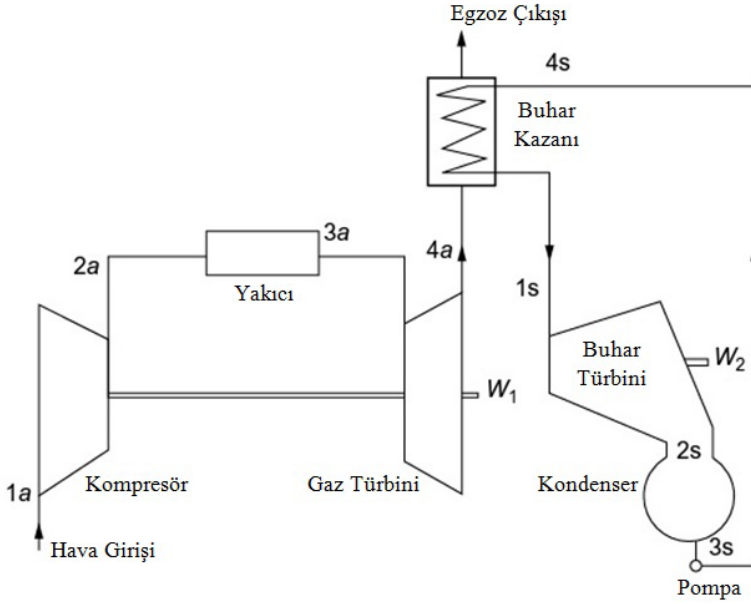
Bu türbinler 20 ila 350 kW aralığındadır. Bu türbinlerin büyümesi, bölgesel elektrik üretim pazarında bir artış olduğu için 1990'ların sonlarından itibaren hızlı olmuştur.

6. 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.

2.2 Gaz-Buhar Kombine Çevrimi

Gaz türbini ve buhar türbinleri günümüzde birçok elektrik üretim santralinde ve endüstriyel proses tesislerinde kullanılmaktadır. Gaz-buhar (Brayton-Rankine) kombine çevrimi, gaz türbininde meydana gelen yanma sonucu dışarı atılan sıcak egzoz gazlarının buhar türbini için kızgın buhar oluşturmak amacıyla kullanılmasına dayanan bir sistemdir. Şekil 2’de bu çevrimin şematik gösterimi verilmiştir.

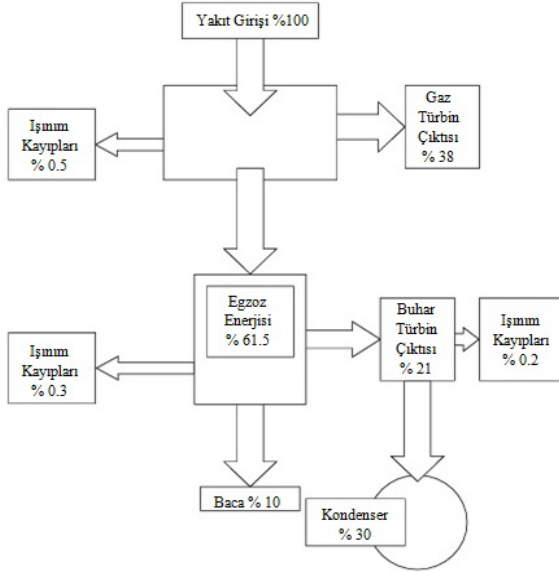


Şekil 2. Gaz-Buhar (Brayton-Rankine) Kombine Çevrimi Şematik Gösterimi (Boyce, 2012)

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 (Boyce, 2012).

Şekil 3’te genel olarak bir kombine çevrim santralinde sisteme giren toplam %100 birim enerjinin faydalı bileşenlerine dağılımı, kondenser ve baca kayıpla-

ryıla 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 (Boyce, 2012).



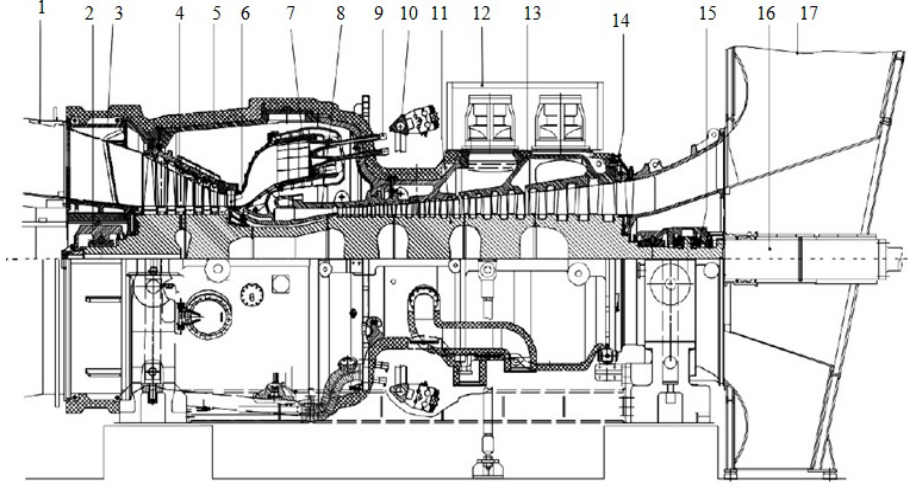
Şekil 3. Kombine Çevrim Santrali Enerji Dağılımı Akış Diyagramı (Boyce, 2012)

2.3 Gaz Türbini Bileşenleri

Şekil 4'te kesit resmi gösterilen GT13E2 modeli bir gaz türbinine ait ana parçalar Tablo 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.

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 (Alstom, 2003).



Şekil 4. GT13E2 Gaz Türbini Kesit Gösterimi (Alstom, 2003)

Tablo 1. GT13E2 Gaz Türbini Kesiti Parça Listesi (Alstom, 2003)

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 yatakları
7	Yanma odası	16	Ara şaft
8	Yakıcı iç muhafazası	17	Hava giriş manifoldu
9	Yakıcılar		

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 sıcaklıktan etkilenmemesi için yüzeyi ısı kal-kanı segmentleri ile kaplanmıştır. Kompresörün tahliye ucundan alınan hava bu segmentler için ek soğutma sağlamaktadır. Bu hava aynı zamanda türbin kanat-larının ilk üç sırasını soğutmak için de kullanılır (Alstom, 2003).

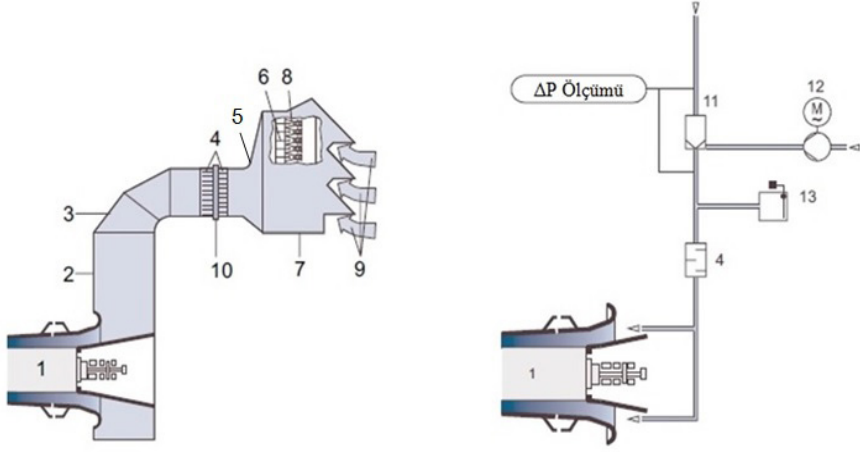
2.3.1 Hava Giriş ve Filtre Sistemi

Gaz türbinleri, çalışma sırasında buldukları ortamın havasını iş akışkanı ola-rak 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 içerisin-de bulunan partiküller ve kirleticiler kompresör ve gaz türbin parçalarında aşın-ma, korozyon, oksidasyon ve degradasyona neden olabilmektedir.

Gaz türbinlerinde kullanılan filtre sistemlerinde bariyer, kendi kendini temiz-leme sistemi, vana, seperatörler ve ızgara uygulamaları bulunmaktadır. Kara tabanlı uygulamalar için çoğunlukla ya bariyer filtreler ya da kendi kendini tem-izleyen filtre sistemleri kullanılır. Kendi kendini temizleyen filtre sistemleri esasen filtre malzemesini darbeli olarak temizlemek için ara sıra basınçlı hava kullanımına izin veren bariyer filtrelerdir (Kurz, Meher-Homji, Brun, Moore ve Gonzalez, 2013)

Şekil 5'te kesit resmi gösterilen GT13E2 modeli bir gaz türbinine ait hava giriş ve filtre sistemi parçaları Tablo 2'de verilmiştir. Şekil 5'te gösterilen gaz türbini giriş havası filtre sistemi yoğun toz ortamlarında (çöl) kullanılabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Ayrıca bu sistem düşük toz yoğunluklu soğuk kutup ortamlarına da uygundur.

Kendi kendini temizleme özelliğine sahip bu sistemde ana akışın tersi yönde kısa bir basınçlı hava jeti vasıtasıyla çalışma sırasında filtre elemanlarının oto-matik 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 ka-pakları bulunur. Gaz türbinlerinde giriş hava kalitesi sistemin performansı ve ömrü için çok önemli bir parametre olması nedeniyle gaz türbinlerinin çalış-ma ortamlarına göre hava giriş ve filtrasyon sistemleri özel olarak dizayn edil-mektedir. 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 (Alstom, 2003).



Şekil 5. GT13E2 Gaz Türbini Hava Giriş ve Filtre Sistemi (Alstom, 2003)

Tablo 2. Gaz Türbini Hava Giriş ve Filtre Sistemi Parça Listesi (Alstom, 2003)

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		

2.3.2 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.

Eksenal akışlı bir kompresörde hava bir kademedan diğerine geçerken her kademede basınç bir miktar yükseltmektedir. Birden fazla kademenin kullanılması, bazı havacılık ve uzay uygulamalarında 40:1'e kadar genel basınç artışlarına

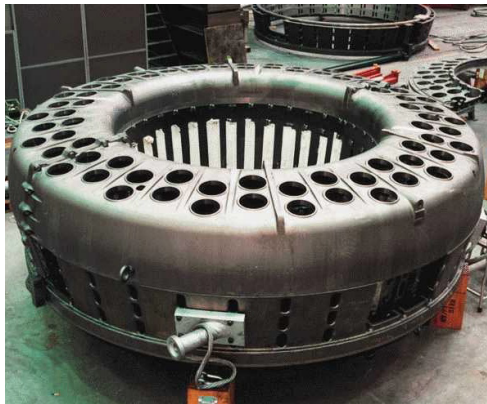
ve bazı endüstriyel uygulamalarda 30:1'lik bir basınç oranına izin vermektedir (Boyce, 2012).

2.3.3 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 oluşturulmuştur.

2.3.4 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 stokiyometrik 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 profilinin düzgünlüğü ile ölçülmektedir (Boyce, 2012).



Resim 2. GT13E2 Gaz Türbini Dairesel Yakıcı Yanma Odası (Alstom, 2003)



Resim 3. GT13E2 Gaz Türbini EV Yakıcı (Alstom, 2003)

Resim 2’de GT13E2 gaz türbini dairesel yanma odası yakıcı ringi gösterilmektedir. Yanma odasındaki yakıcılar türbin muhafazası içinde, kompresör ve türbin arasındaki resimde görülen 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 (Alstom, 2003).

Resim 3’te gösterilen GT13E2 gaz türbinlerinde kullanılan EV yakıcı, düşük NO_x özellikli, basit bir tasarıma sahip, güçlü girdap akımlı bir ön karışımli yakıcıdır. EV yakıcı, aksel 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 (Alstom, 2003).

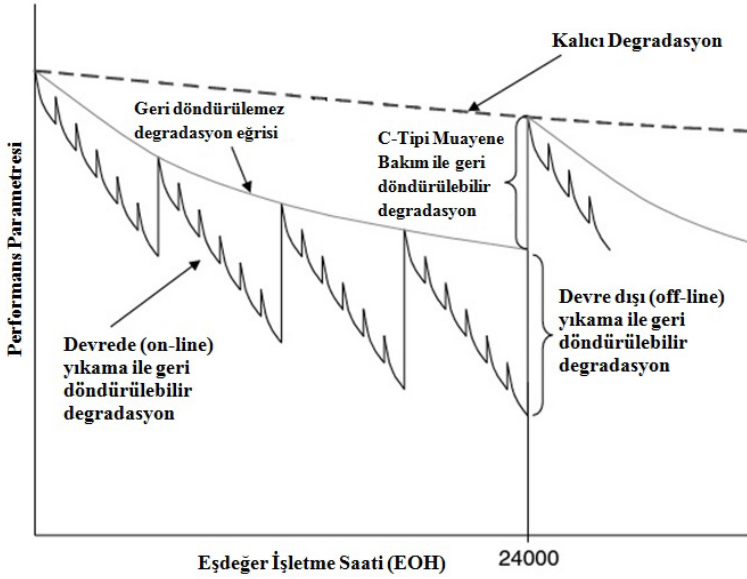
2.4 Gaz Türbinlerinde Degradasyon

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 (Kurz ve Brun, 2000).

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 (Tejedor, Singh ve Philididis, 2013).

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 6'da gösterilmektedir. Şekil 6'da 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.



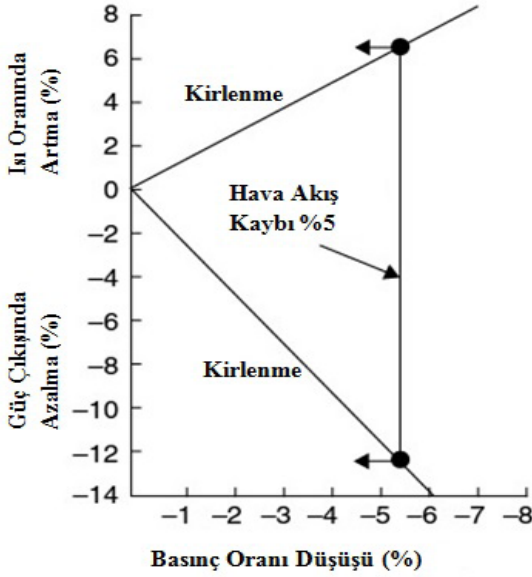
Şekil 6. Gaz Türbini Eşdeğer İşletme Saatine Göre Performans Degradasyonu (Kappis, 2013)

2.4.1 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 (Kurz ve Brun, 2000).

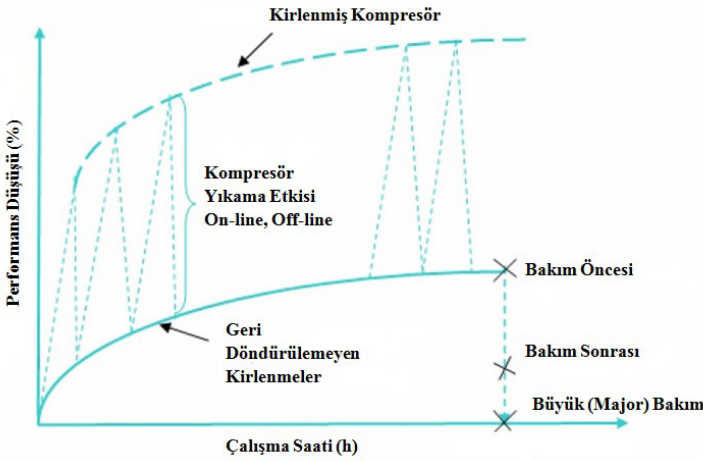
Gaz türbini sisteminde kirlenmeye neden olan en önemli faktör sisteme giren havadır. Bir gaz türbininde üretilen her bir megavat güç için dakikada yaklaşık 200 - 255 m^3 havanın sisteme girdiği değerlendirildiğinde giriş havasının kirlenmeyi önleyecek düzeyde iyi filtrelenmesi gerekmektedir (Boyce, 2012).

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 7'de %5 hava giriş kaybına göre oluşturulmuştur (Kurz ve Brun, 2001).



Şekil 7. Kirlenmenin Isı Katsayısı, Basınç Oranı ve Güç Çıkışına Etkisi (Loud, 1991)

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 8'de kirlenmeye bağlı performans düşüşü gösterilmektedir (Diakunchak, 1992).



Şekil 8. Kirlenmeye Bağlı Performans Düşüşü (Diakunchak, 1992)

2.4.2.Korozyon

Korozyon, metalin bulunduğu ortamla kimyasal reaksiyona girmesi sonucu yüzey metallerinin 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 (Brun ve Kurz, 2010):

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 (Kurz, Meher-Homji, Brun, 2014).

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 (Kurz ve diğ., 2014).

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 (Kurz ve diğ., 2014).

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 (Kurz ve diğ., 2014).

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 (Kurz ve diğ., 2014).

2.4.3 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. Genel bir kural olarak, kesit alanı kaybı %10-15'i aştığında kanat değişimi dikkate alınmalıdır (Kurz ve diğ., 2013).

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.

2.4.4 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 (Diakunchak, 1992).

2.5. Gaz Türbini Bakımları

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.

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 (Boyce, 2012):

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 (Boyce, 2012).

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 (Boyce, 2012).

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 (Boyce, 2012).

İyi bir bakım programının hedefi "Sıfır arızadır. Bu hedefe ulaşmak için beş karşı tedbir bulunmaktadır (Boyce, 2012).

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.

2.5.1 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 (Boyce, 2012).

Emre amadelik faktörü (AF), (ISO 3977-9, 1999) standardında aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

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

Eş. 1’de 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 ve Eş. 2 ile verilir (ISO 3977-9, 1999).

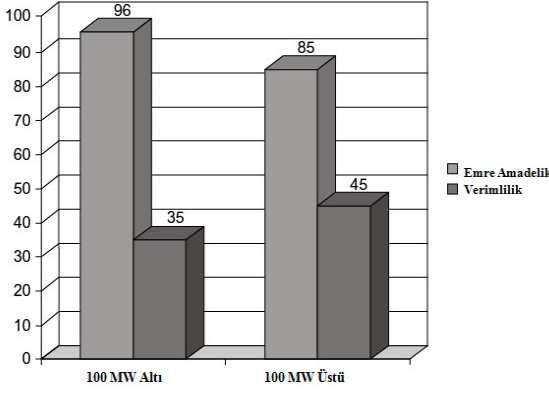
$$RF = 1 - \frac{FOH}{PH} = 1 - FOF \quad (2)$$

burada, FOH, zorunlu kesinti saatleri, PH, toplam dönem saatleri, FOF, zorunlu kesinti faktörünü ifade etmektedir.

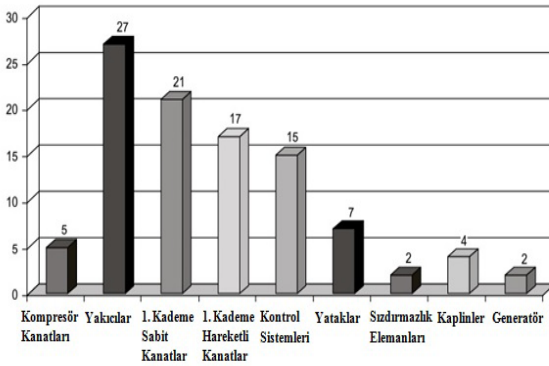
Yeni teknolojiye sahip gaz türbinlerinde 100 MW’ın altındaki üniteler için emre amadelik faktörü %94-97 arasındayken, 100 MW’ın üzerindeki daha büyük üniteler %85-89 emre amadelik faktörüne sahiptir. Daha büyük üniteler iki kat daha fazla üretim yapmaktadır, ancak emre amadelik faktörü %95’ten %85’e düşmüştür. Tüm üreticiler için 7-10 puanlık bir düşüş söz konusudur. Bu düşüşün bir kısmı daha büyük makinelerin tamirinin daha fazla zaman almasıyla ilgilidir. 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 9’da 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 \$ gelir kaybına 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 (Boyce, 2012).

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 10'daki 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 9. Emre Amadelik-Verimlilik Grafiği (Boyce, 2012)



Şekil 10. Gaz Türbini Bileşenlerinin Duruş Süresine Katkıları (Boyce, 2012)

2.5.2 Gaz Türbini Muayene ve Bakım Tipleri

Hazırda bekleme (stand-by) bakımları özellikle aralıklı hizmette kullanılan gaz türbinleriyle ilgilidir. Başlatma güvenilirliği 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 çalıştırması, stand-by bakımının önemli bir parçasıdır (Knorr ve Jarvis, 1975).

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.

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

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 (Beagle, Moran, McDufford, Merine, 2021).

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 (Beagle ve diğ., 2021).

2.5.3 Eşdeğer İşletme 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 (Cilindro, 2015).

$$t_{EOH} = a_1n_1 + a_2n_2 + \sum_{i=1}^n t_i + \sum_{l=1}^{n_{OH}} (f_l w_l b_l \Delta t_l) \quad (3)$$

burada, t_{EOH} eşdeğer işletme saatini (EOH), a_1 başlatma faktörünü, n_1 başlatma sayısını, a_2 hızlı yüklemelerin faktörünü, n_2 hızlı yüklemelerin sayısını, n hızlı sıcaklık değişikliklerinin sayısını, t_i hızlı sıcaklık değişiklikleri için eşdeğer işletme saatini, n_{OH} işletme sırasındaki veri noktalarının sayısını, f_l yakıt faktörünü, w_l su faktörünü, b_l işletim faktörünü ve Δt_l iki veri noktası arasındaki süreyi göstermektedir.

2.6 Gaz Türbini C-Tipi Bakım Çalışması

Bu çalışmada, Alstom (GE) GT13E2 1996 model, bir gaz türbininin 8. C tipi (combustion) bakımı incelenmiştir. Seçilen türbindeki bakım çalışması 8. C tipi bakımdır. Bakım kapsamında yapılan işlemler şu şekildedir.

- Bakım öncesi bakım yapılacak saha hazırlanarak kullanılacak malzeme, yedek malzeme, özel takımlar 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 kaçaıklarının gözden geçirilmesi,
- Ünitenin devreden çıkarılması,
- Ünitenin soğuması için gerekli sürenin beklenmesi,
- 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 girişi 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,
- 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,
- Türbinin tüm kademelerdeki hareketli ve sabit kanatlarının, sabit kanat taşıyıcılarının, rotor ve statorunun ve bağlantı parçalarının gözle kontrolü ve muayenesinin yapılması,
- Türbinin 1. 2. ve 3. kademe sabit kanatlarının 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,
- Türbin 1. kademe kanatların hassas radyal boşluklarının sağlanması için uçlarının taşlanması,
- Kompresörün tüm kademelerdeki hareketli ve sabit kanatlarının, sabit kanat taşıyıcılarının, rotor ve statorunun ve bağlantı parçalarının gözle kontrolü ve muayenesinin yapılması,

- Kompresör girişinde, IGV ekipmanında, yatak muhafazasında, desteklerde ve genel yapısında kalıntı malzeme (deposit), hasar, korozyon ve yabancı cisimlerin kontrolü, tespiti, gerekli muayenelerin yapılarak bakım ve temizliğinin yapılması,
- 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,
- Yağ filtre sisteminin tümünün kontrolünün yapılması, filtrelerin yenileri ile değiştirilmesi, filtre sisteminde düzeltici bakım ve onarım işlemlerinin yapılması,



Resim 4. Hava Giriş Kanatları



Resim 5. Filtre Giriş Izgarası

- Doğalgaz ve motorin kontrol ve acil durdurma valflerinin gözle muayenesi ve fonksiyon testlerinin yapılması,
- Türbin ve kompresör yatağı, yatak muhafazaları, kaidesinde, geri dönüş, sızıntı, giriş yağ hatlarında gözle muayenelerinin yapılması,
- 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,



Resim 6. Hava Kanalları



Resim 7. Hava Giriş Üst Muhafazası Sızdırmazlık Contası

2023 yılında gerçekleştirilen bakım kapsamında elde edilen bulgular ve iyileştirmeler aşağıda özetlenmiştir.

Resim 4'te, hava giriş sistemindeki filtre odasının girişindeki kanatlarda kirlilik ve kanat yüzeylerinde sert ve kabuklaşmış kalıntılar tespit edilmiştir. C tipi bakım kapsamında su jeti yardımıyla temizlenerek kalıntı kirlilikler giderilmiştir. Resim 5'te, 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.

Resim 6'da 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 boya yüzeyleri ve paslı bölgeler zımpara işlemi yapıldıktan sonra yeniden bölgesel olarak boyanmıştır. Resim 7'de, 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 boya yüzeyleri ve paslı bölgeler zımpara işlemi yapıldıktan sonra yeniden bölgesel olarak boyanmıştır.

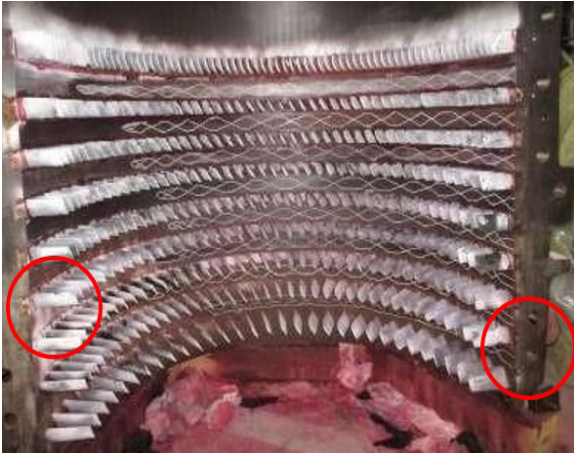


Resim 8. Ajarlanabilir Giriş Kılavuz Kanatları (VIGV) (Tuğran Enerji, 2023)

Resim 8’de, ajarlanabilir 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 9’da görülen kompresör sabit kanat taşıyıcı (CVC) üst parçada 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 10’da görülen kompresör sabit kanat-

larında (vane) 1. sıradan 4. sraya 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. sraya 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.



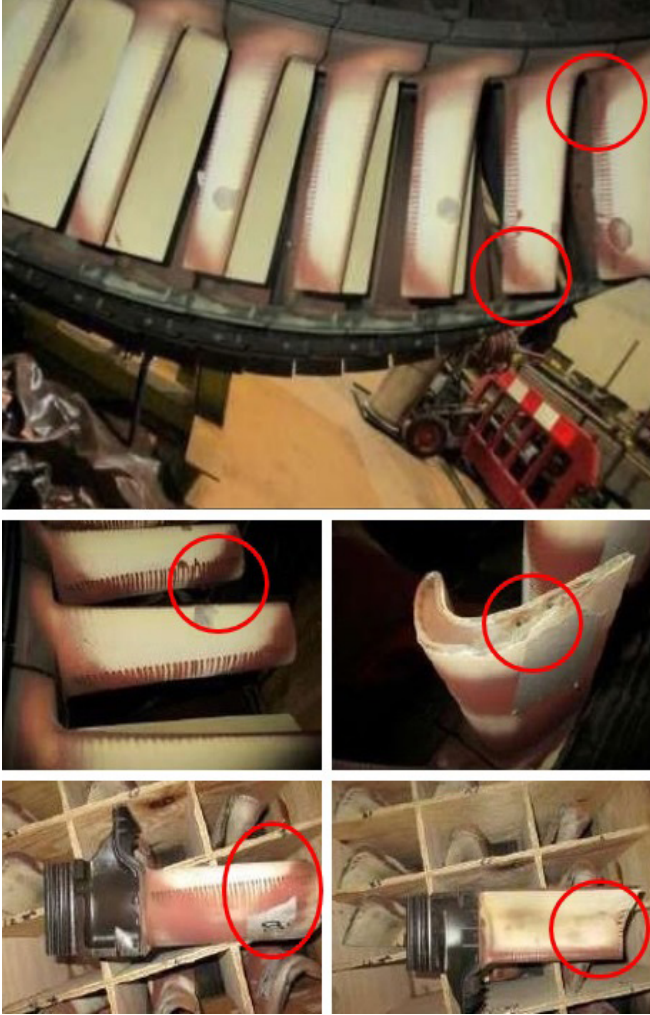
Resim 9. Kompresör Sabit Kanat Taşıyıcısı (CVC)



Resim 10. Kompresör Sabit Kanatları (1-4. sıra)

Resim 11'de görülen türbin 1. kademe hareketli kanatlarda oksidasyon, korozyon ve kanat uçlarında malzeme kaybı tespit edilmiştir. Bakım kapsamında 1.

kademe hareketli kanatların tamamı yenileriyle değiştirilmiştir. Resim 12'de görülen türbin radyal yataklardan 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 iyileştirmeler nedeniyle türbin yatağı ve şaft vibrasyonu değerleri bakım öncesi değerlere göre daha iyi duruma getirilmiştir.



Resim 11. Türbin 1. Kademe Hareketli Kanatlar



Resim 12. Türbin Radyal Yatağı

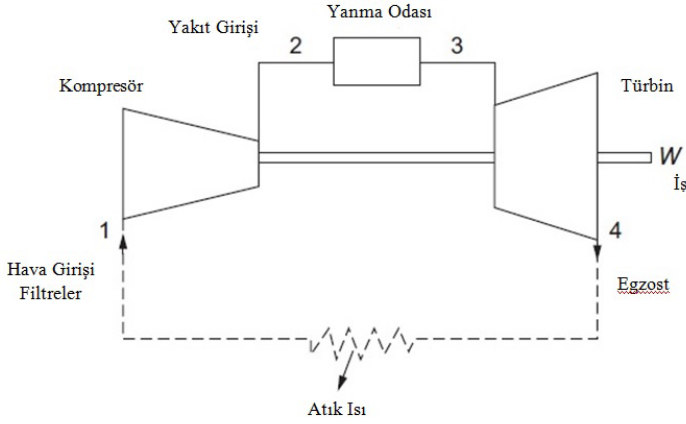
3. Filtre Değişiminin Etkisine ve Ekonomik Analizine İlişkin Hesaplamalar

Bakım kapsamında performans analizi yapılan gaz türbini, Şekil 11'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. Aşağıdaki eşitliklerde termodinamik analizlerde kullanılan formüller verilmiştir.

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_T - \dot{W}_K \quad (4)$$

$$\dot{W}_T = \dot{m}_g(h_3 - h_4) = \dot{m}_g(c_{pg(T3)}T_3 - c_{pg(T4)}T_4) \quad (5)$$

$$\dot{W}_K = \dot{m}_h(h_2 - h_1) = \dot{m}_h(c_{ph(T2)}T_2 - c_{ph(T1)}T_1) \quad (6)$$



Şekil 11. Açık Çevrim Bir Gaz Türbini Şematik Gösterimi (Boyce, 2012)

burada, T_1 çevre sıcaklığı (K), T_2 kompresör çıkış sıcaklığı (K), T_3 türbin giriş sıcaklığı (K), T_4 türbin çıkış sıcaklığı (K), m_h hava debisi (kg/s), m_g gaz debisi (kg/s), \dot{W}_T türbin gücü (kW), \dot{W}_K kompresör gücü (kW) ve \dot{W}_{net} net güç (kW)'tür. Havanın ve yanma gazlarının sabit basınçtaki özgül ısıları c_{ph} ve c_{pg} , sıcaklığın fonksiyonu olarak Eş. 7 ve 8'de gösterilmiştir (Çetin, 2005).

$$c_{ph}(T) = 1,04841 - 0,000383719 T + \left(\frac{9,45378 T^2}{10^7} \right) \quad (7)$$

$$- \left(\frac{5,49031 T^3}{10^{10}} \right) + \left(\frac{7,92981 T^4}{10^{14}} \right) \quad [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$$

$$c_{pg}(T) = 0,991615 + \left(\frac{6,99703 T}{10^5} \right) + \left(\frac{2,71298 T^2}{10^7} \right) - \left(\frac{1,22442 T^3}{10^{10}} \right) \quad [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})] \quad (8)$$

Kompresör çıkış sıcaklığı T_2 ve türbin çıkış sıcaklığı T_4 Eş. 9 ve 10 ile hesaplanabilir.

$$T_2 = T_1 \left[1 + \frac{P_{rc}(k_h - 1)/k_h - 1}{\eta_{cis}} \right] \quad (\text{K}) \quad (9)$$

$$T_4 = T_3 \left[1 - \eta_{tis} \frac{1}{P_{rt}(k_g - 1)/k_g} \right] \quad (\text{K}) \quad (10)$$

burada, P_{rc} kompresör basınç oranı, P_{rt} türbin basınç oranı, k_h havanın özgül ısı oranı, k_g yanma gazının özgül ısı oranı, η_{cis} kompresör izentropik verimi ve η_{tis}

türbin izentropik verimidir. Basınç oranı, gerçek durumda basınç kayıpları için basınç kaybı değerleri ise Eş. 11-14 ile bulunabilir.

$$P_{rc} = \frac{P_2}{P_1} \quad (11)$$

$$P_3 = P_2 (1 - \varepsilon_{YO}) \quad (\text{bar}) \quad (12)$$

$$P_4 = P_1 (1 + \varepsilon_{\zeta}) \quad (\text{bar}) \quad (13)$$

$$P_{rt} = \frac{P_3}{P_4} \quad (14)$$

burada, ε_{YO} yanma odası basınç kayıp parametresi (sbt: 0,02) ve ε_{ζ} çıkıştaki basınç kayıp parametresi (sbt: 0,02) olarak kabul edilmiştir. Gazların (\dot{m}_g) ve yakıtın (\dot{m}_y) kütledebileri, termodinamiğin birinci kanununa göre yanma odasındaki kütle ve enerji dengesinden Eş. 15 ve 16 ile bulunabilmektedir (Çetin, 2006).

$$\dot{m}_g = \dot{m}_h + \dot{m}_y \quad (15)$$

$$\dot{m}_y = \dot{m}_h \left[\frac{c_{pg}(T_3) T_3 - c_{ph}(T_2) T_2}{LHV \eta_Y - c_{pg}(T_3) T_3} \right] \quad (16)$$

burada, LHV yakıtın alt ısıl değeri, 46 286 (kJ/kg), η_Y yanma verimi, 0,98 olarak kabul edilmiştir ve \dot{Q}_{YO} yanma odasına verilen ısıl güçtür (Eş. 17). Sistemin verimi ve ısı oranı ile ilgili hesaplamalar Eş. 18 ve 19 ile bulunabilir.

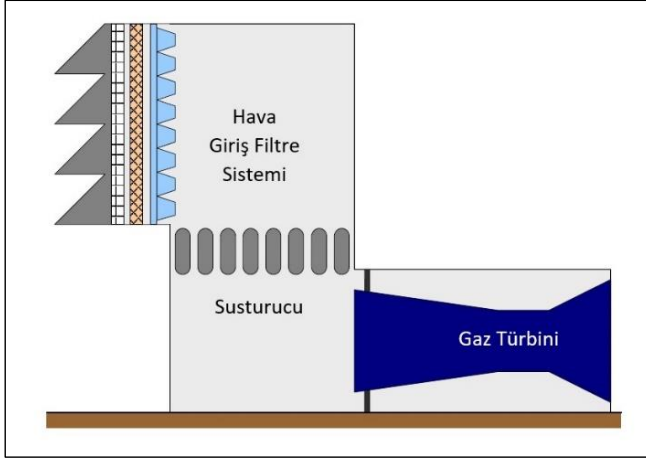
$$\dot{Q}_{YO} = \dot{m}_y LHV \eta_Y \quad (17)$$

$$\eta_G = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{YO}} \quad (18)$$

$$HR = \frac{3600}{\eta_G} \quad (19)$$

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

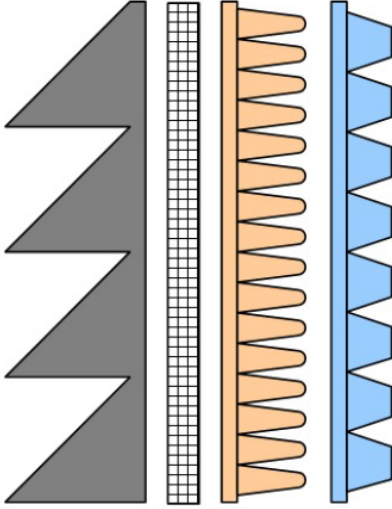
12’de gaz türbini hava giriş filtre sisteminin konumu şematik gösterimi verilmiştir. Filtre sistemleri, giriş havasının içeriğinde bulunan kirleticilerin gaz türbinine etkilerini en aza indirmek için tasarlanmıştır. Havadaki farklı kirletici türleri gaz türbini güvenilirliğini, emre amadeliliğini, bakım 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 13’te gösterilen bir tasarım yapılmıştır.



Şekil 12. Filtre Sistemi Şematik Gösterimi (Wilcox, Baldwin, Garcia-Hernandez, Brun, 2010)

Şekil 13’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. uçsuz canlı veya cansız varlıkların sisteme girişini engelleyen bir perdeli süzgeç yapısı bulunur. Ardından üçüncü sırada paket tip, 8 cepli, ePM10, %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 320 adet ince ePM1 F9 %80 MIN ve 320 adet kaba ePM10 M6 %60 MIN filtre bulunmaktadır.



Şekil 13. Filtre Sistemi Tasarımı (Wilcox ve diğ., 2010)

Tablo 3. Kaba Filtre Teknik Özellikleri (Freudenberg)

Özellik	Parametre
Filtre sınıfı	ePM10 %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

Tablo 4. İnce Filtre Teknik Özellikleri (Freudenberg)

Özellik	Parametre
Filtre sınıfı	ePM11 %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

Bakımın yapıldığı 2023 yılında filtrelerin son değişim tarihinden bu yana yaklaşık 5 yıl geçmiştir. Sahadan alınan verilerin aşağıdaki koşullarda yapılan hesaplamalar ile karşılaştırılması sonucunda elde edilen sonuçların gerçek sonuçlarla arasında yaklaşık %0,89 sapma tespit edilmiştir. Buna istinaden, hava giriş filtrelerinde zaman içerisinde meydana gelen kirlenmenin basınç farkı değerlerine göre ortaya çıkan etkileri analiz edilmiştir. Analizlerde basınç kaybı parametresi değiştirilirken diğer faktörler sabit tutulmuştur.

Δp : 5 / 6 / 9 / 12 / 15 mbar

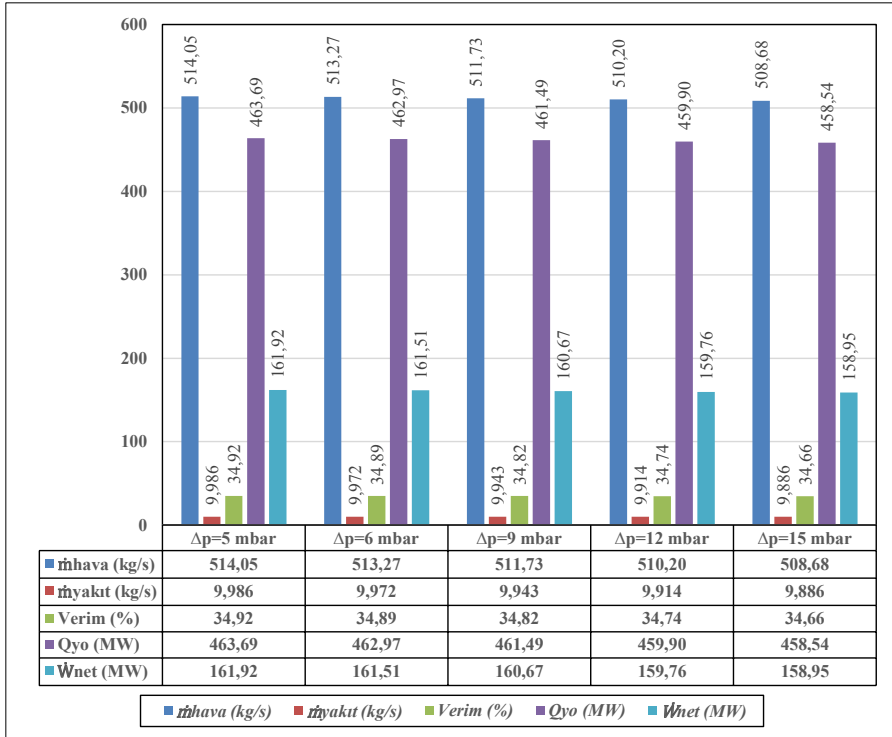
Bağıl nem %64

Dış ortam sıcaklığı 13°C

Dış ortam basıncı 1022 mbar

Filtre sistemindeki basınç farkının zamanla artması giriş havasındaki kirletici 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" (Boyce, 2012) ibaresi yer almaktadır.

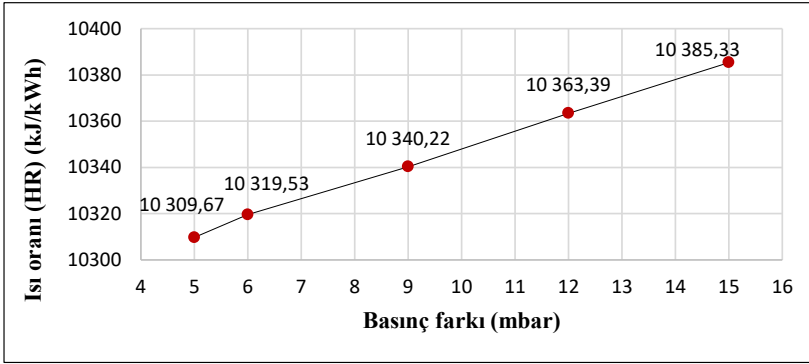
Bu çalışmada incelenen Alstom (GE) GT13E2 tipi gaz türbinindeki filtre sistemindeki basınç farkı değerlerine göre hava debisinin, yakıt debisinin, verimin, yanma odası gücünün ve sistem net gücünün değişimi Şekil 14'te verilmiştir. Gaz türbini giriş hava filtre sisteminde ilk olarak ele alınan Δp basınç farkı değeri 5 mbar'dır.



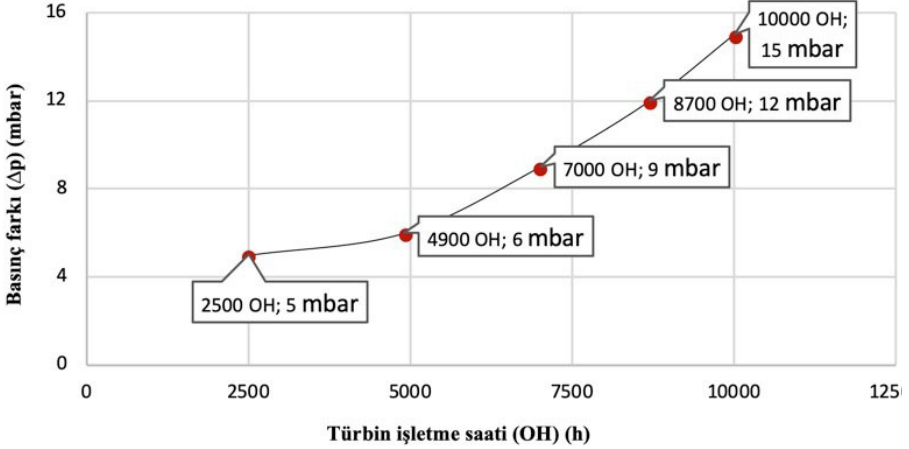
Şekil 14. Filtre Basınç Farkı Nedeni İle Sistem Parametrelerinin Değişimi

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 %1,84 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. Filtrelerdeki basınç düşüşüne göre 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 ısı oranında %0,3 artışa neden olduğu (Boyce, 2012), bir diğer kaynakta da %0,1 artışa neden olduğu (Wilcox ve diğ., 2010) belirtilmektedir. Analiz sonuçlarına göre gaz türbini filtre sistemindeki basınç düşüşü değerlerine göre ısı oranında, her 2,5 mbar basınç düşüşünde yaklaşık olarak ortalama %0,18 artış olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 15'te ısı oranının filtrelerin yol açtığı basınç farkı ile değişim grafiği yer almaktadır. Gaz türbini giriş hava sistemindeki filtrelerde meydana gelen basınç düşüşünün giriş

hava debisi ve yakıt tüketimi miktarlarına etkileri Şekil 14'te belirtilmiştir. Δp değerinin 5 mbar'dan 15 mbar'a kadar artışıyla birlikte giriş hava debisinde ve sistemin veriminde düşüş gözlemlenmiştir. Giriş hava debisinin 514,05 kg/s değerinden 508,68 kg/s değerine kadar azalmasıyla birlikte yakıt tüketiminde de 9,99 kg/s değerinden 9,89 kg/s değerine doğru bir miktar düşüş ortaya çıkmıştır. Bunun yanında, sistemin genel verimi ilk durumda %34,92 olarak hesaplanmıştır. Bu değer de girişteki basınç düşüşünün 10 mbar artışı ile birlikte %34,66 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 15. Isı Oranının Filtrelerin Yol Açtığı Basınç Farkı İle Değişimi



Şekil 16. Türbin İşletme Saatine Göre Basınç Farkı Değerlerinin Değişimi

Santralde kullanılan filtrelerin değişim periyodu için basınç kaybı değerinin et-

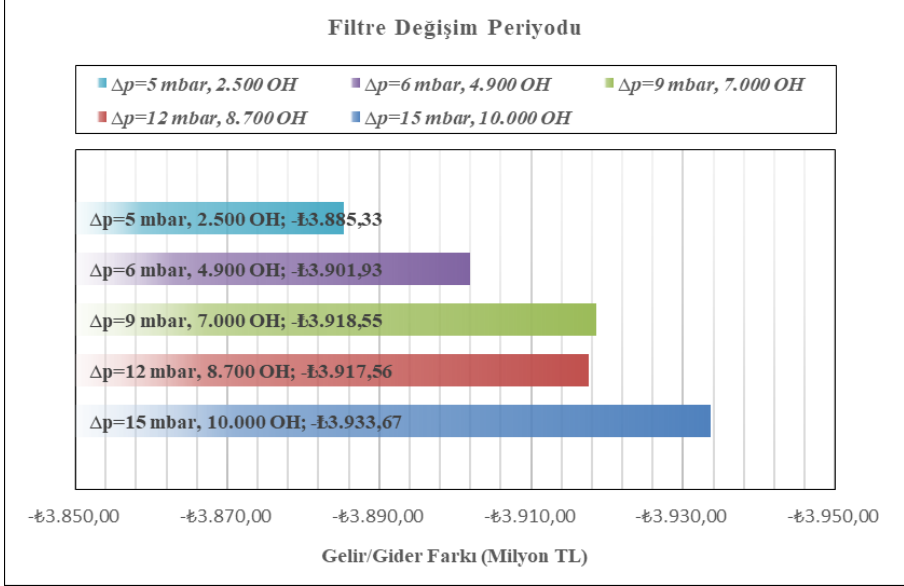
kileriyle ilgili bir maliyet analizi yaparak analiz sonuçlarına göre değiştirmek uygulamada daha çok kullanılmaktadır. İki kademeli filtre sistemlerinde 5000 ile 10.000 işletme saati (OH) aralığında değişim yapılması tavsiye edilmektedir (Wilcox ve diğ., 2010). Santralden elde edilen verilere göre filtre değişim periyotlarını çeşitli zaman dilimlerine göre değerlendirmek için öncelikle Δp artışının işletme saatine göre dağılımı belirlenmiştir. Toplamda 10.000 OH üzerinden bir değerlendirme yapılması planlanmıştır. Bu değerlendirmeye göre Şekil 16'daki Δp değişim grafiği oluşturulmuştur.

Şekil 16'ya 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 alışı 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 itibarıyla 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 sonucunda santralin giriş hava filtrelerinin değişiminin $\Delta p = 5$ mbar değerine ulaştığında ve yaklaşık olarak her 2500 OH çalışma süresi aralığında yapılması optimum seçenek olarak gözükmektedir. En iyi durum olan 5 mbarlık basınç düşümüne ait değerler Tablo 5'te, tüm durumlar için özet grafik Şekil 17'de belirtilmiştir.

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

GİDER				Gelir/Gider Farkı (TL)
\square_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	

GELİR					Duruş Gideri (TL)	Net Gelir (TL)
Δp (mbar)	OH (h)	\square_{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



Sekil 17. Basınç Farkı Değişimine Göre Gelir Gider Farkının Değişimi

4. Sonuçlar ve Öneriler

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, Alstom (GE) GT13E2 1996 model, 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 çalışma 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 incelen-

miştir. 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 %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 çıkış gücü ve yakıt tüketim miktarlarındaki değişimlere göre filtre değişim periyotlarının, filtre maliyetleri, duruş süreleri ve değişim işçilikleri hesaplanarak yapılan analizlere göre günümüz koşullarında yakıt maliyetlerinin yüksekliği ve elektrik satış fiyatının nispeten düşük olması nedeniyle gelir gider arasındaki fark eksi çıkmaktadır. İki aşamalı filtre sistemlerinde 5000 ile 10.000 işletme saati (OH) aralığında filtre değişiminin yapılması tavsiye edilmektedir (Wilcox ve diğ., 2010). Buna karşın, güncel fiyatlarla mevcut duruma göre yapılan maliyet analizine göre santralin giriş hava filtrelerinin değişiminin $\Delta p = 5$ mbar değerine ulaştığında ve yaklaşık olarak her 2500 OH çalışma süresi aralığında yapılması optimum seçenek olarak gözükmektedir.

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 etkilenecek 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 yatak ve şaft 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.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynakça

- 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. Erişim Adresi: <https://www.gevernova.com/gas-power/resources/technical-downloads/ger-3620p-operation-maintenance-considerations>
- Boyce, Meherwan P. (2012). *Gas Turbine Engineering Handbook*. (Fourth Edition). Waltham: Butterworth-Heinemann.
- Brun, K., Kurz, R. (2010). *Turbo myth busters*. *Turbomachinery International*, 51(2), 40.
- 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.
- Çetin, B. (2005). Çok amaçlı enerji üretim sistemlerinin termoekonomik optimizasyonu. Doktora Tezi, *YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Çetin, B. (2006). Gaz türbinlerinin optimal performans analizi. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 7(1) 59-71.
- Diakunchak I. S. (1992, April). Performance degradation in industrial gas turbine. *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 114(2), 161-168. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.2906565>
- Freudenberg Filtration Technologies Product Catalog International. (2024). *Compact pocket filter T 60 T 60 1/1 8L Viledon*.
- Freudenberg Filtration Technologies Product Catalog International. (2024). *Maxi-pleat cassette filters box type series, MX 98 R-D Viledon*.
- ISO 3977-9:1999, (1999). *Gas turbines – Procurement – Part 9: Reliability, availability, maintainability and safety standard*.

- İnternet: Alstom GT13E2 gas turbine information documentation. (2003). Erişim Adresi: :<https://www.scribd.com/document/411248140/GT13E2-General-Data-pdf> Son Erişim Tarihi: 15.06.2024
- 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.
- Knorr, R. H., Jarvis, G. (1975). Maintenance of industrial gas turbines. ASME Publication 75-GT-93. *General Electric Company. Schenectady*, New York.
- Kurz, R., Brun K. (May 2000). Degradation in gas turbine systems, *Conference Paper in Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*.
- 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. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.1340629>
- 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.
- Loud, L. A. A. S. (1991). Gas turbine inlet air treatment. *General Electric Company. Schenectady*, New York.
- Meher-Homji, Cyrus B. (2000). The historical evolution of turbomachinery. *Proceedings of the 29th Turbomachinery Symposium*, Texas, 281-322.
- 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.
- Tuğran Enerji A.Ş. (2023). EÜAŞ Tekirdağ Combined Cycle Power Plant (A) GT13E2 8th C-inspection Report. Tekirdağ.
- 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.