



IJEASED

INTERNATIONAL JOURNAL OF EASTERN ANATOLIA
SCIENCE ENGINEERING AND DESIGN

Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi

ISSN: 2667-8764 , 4(2), 77-92, 2022

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijeased>



Araştırma Makalesi / *Research Article*

Doi: [10.47898/ijeased.1081563](https://doi.org/10.47898/ijeased.1081563)

Bir Turboprop Motorda Kirlenmenin ve Yıkama Yöntemlerinin Deneysel İncelenmesi

Muhammet ÖZBEK ^{*1}, Bilge ALBAYRAK ÇEPER ²

^{1*} Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 38039, Türkiye.

² Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Kayseri, 38039, Türkiye.

Yazar Kimliği / <i>Author ID (ORCID Number)</i>	Makale Süreci / <i>Article Process</i>
*Sorumlu Yazar / <i>Corresponding author</i> : elektron0342@gmail.com  https://orcid.org/0000-0001-9647-489X , M. Özbek  https://orcid.org/0000-0001-5556-5170 , B.A. Çeper	Geliş Tarihi / <i>Received Date</i> : 02.03.2022 Revizyon Tarihi / <i>Revision Date</i> : 29.06.2022 Kabul Tarihi / <i>Accepted Date</i> : 29.07.2022 Yayım Tarihi / <i>Published Date</i> : 15.12.2022
Alıntı / <i>Cite</i> : Özbek, M., Albayrak Çeper, B., (2022). Bir Turboprop Motorda Kirlenmenin ve Yıkama Yöntemlerinin Deneysel İncelenmesi, Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi , 4(2), 77-92.	

Özet

Bu çalışmada, T56-A-15 turboprop motorun servis sürecinde bünyesinde meydana gelen kirlenme ve motor yıkamasının deneysel incelemesi gerçekleştirilmiştir. Meydana gelen kirlenmeler ile bu kirlenmeler sonucunda fiziksel dayanımı zayıflayan malzemelerin hasarlanması sorunu, bünyesel anlamda ele alınmıştır. Yapılan yanma odası ve türbin yıkaması ile sıcak bölge hasarlarının azaltılması, malzeme ömrünün ve motor revizyon süresinin artırılması amaçlanmıştır. Motor yıkaması yapılırken kompresör yıkamasının yanında yanma odası ve türbin yıkamasının da etkili olduğunu görülmüştür. T56 turboprop motoruna ait Tork, Türbin giriş sıcaklığı ve performans parametreleri analiz edilmiştir. Yakıt nozulları vasıtasıyla yapılan motor yıkaması sayesinde yıkama sıvısının kompresör haricinde yanma odası ve türbin kanatçıklarına etkin ulaştığı görülmüştür. Motor tork değerinin artması sonucu motor performans değerleri artmıştır. Kompresör ve yakıt nozulları ile yıkamada yıkamasız duruma göre yaklaşık %3,39 iyileşme elde edilmiştir. Yapılan araştırmanın gaz türbin motorlarında yapılacak motor yıkama analizi çalışmalarına referans olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Turboprop, Kirlenme, Motor Yıkama.

Experimental Investigation of Contamination and Washing Methods in a Turboprop Engine

Abstract

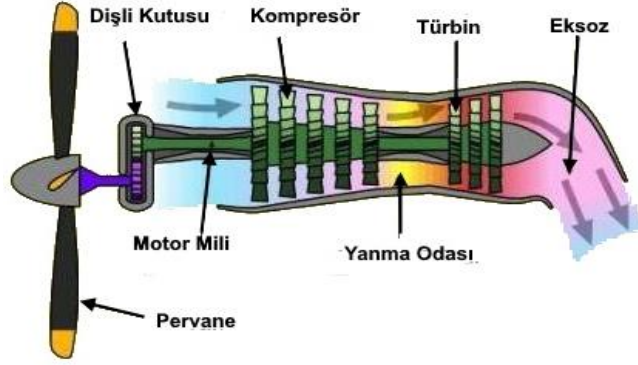
In this study, an experimental investigation of the contamination and engine washing that occurs during the service process of the T56-A-15 turboprop engine was carried out. The problem of the pollution that occurs and the damage of the materials whose physical strength is weakened as a result of these pollutions are handled in an inherent sense. With the combustion chamber and turbine washing, it is aimed to reduce the damages of the hot zone, to increase the material life and the engine overhaul time. It has been observed that the combustion chamber and turbine washing are also effective in addition to the compressor washing while washing the engine. T56 turboprop engine data Torque, Turbine inlet temperature and performance parameters are analyzed. Thanks to the engine washing done through the fuel nozzles, it was observed that the washing liquid reached the combustion chamber and turbine blades completely, except for the compressor. As a result of the increase in the engine torque value, the engine performance values have increased. Approximately 3.5% improvement was obtained in washing with compressor and fuel nozzles compared to the case without washing. It is thought that the research will be a reference to the engine wash analysis studies to be made in gas turbine engines.

Keywords: Turboprop, Contamination, Engine Wash.

1. Giriş

Günümüzde uçaklar yolcu taşıma, kargo ve askeri amaçlarla kullanılmakta olup, bu kullanım talebi her geçen gün artmaktadır. Bu talebin karşılanması esnasında çeşitli uçak türleri ve bu uçaklara ait farklı motor türleri kullanılmaktadır. Uçaklarda kullanılan gaz türbin motorlarının uzun süre kullanıcıya hizmet verebilmesi için belirli periyodlarla serviste bakım ve revizyonunun yapılması gerekmektedir. Bir uçak görev türüne göre zorlu iklim koşullarında, kumlu ve deniz aşırı görevler icra edebilir. Bu görevlerde uçak tuz, kum zerreleri vb. harici malzemelere maruz kalabilir. Ayrıca gaz türbin motoru çalışma esnasında yüksek sıcaklık, korozyon, titreşim gibi mekanik yükler altında çalışabilir.

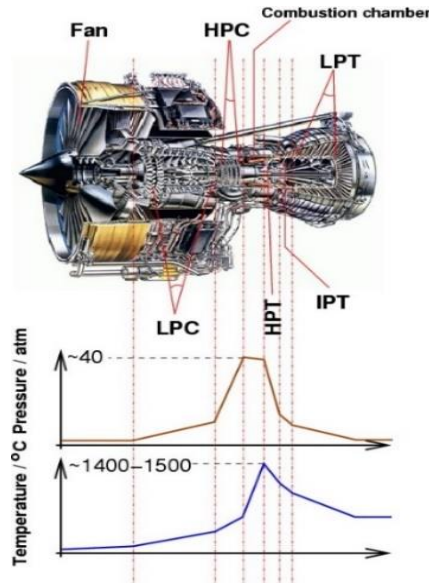
Gaz türbin motorların çoğu aynı mantık ile çalışmaktadır. Temelde gaz türbin motorlar kompresör, yanma odası ve türbin kısımlarından oluşur. Basit olarak bir turboprop motorun çalışması incelendiğinde hava alığından giren hava kompresörde sıkıştırılarak yüksek sıcaklık ve basınçlı hava elde edilir. Isınan hava kompresörden yanma odasına iletilir, yakıt nozullarından püskürtülen yakıt ile hava belli oranda karışır ve yanma odasında bulunan bujilerin ateşlemesi vasıtasıyla yanma gerçekleşir. Yanma odasının buradaki asıl görevi kompresör içerisinde sıkıştırılarak ısınan havanın, yanma sayesinde çok yüksek sıcaklıklara çıkmasını sağlamaktır. Yüksek sıcaklıklara çıkan basınçlı hava yanma odasından sonra türbin kanatlarına çarparak türbinin dönmelerini ve temelde motorun itki kuvvetinin oluşmasını sağlar. Şekil 1’de turboprop motorun hava akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 1. Turboprop Motor Hava Akış Şeması (URL-1).

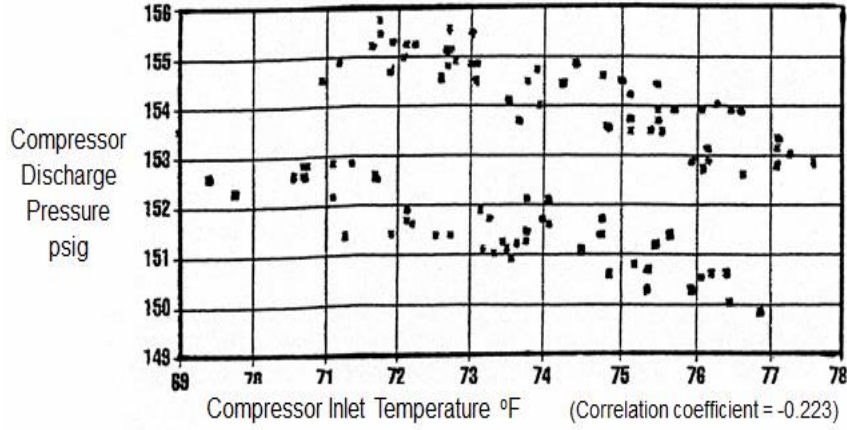
Motor çalıştığı sürece hava alığından giren hava kompresör üzerinden akarak, yanma ve basınçlı sıcak havanın sirkülasyonu devam eder. Bu döngünün devamlılığını sağlayan temel malzeme kompresördür. Bu sebeple kompresör üzerinden kesintisiz hava akışının olması ve kompresör kanatçıklarının aerodinamik yapısının bozulmaması gerekir. Ayrıca motor performansının üretici tarafından istenen değer aralığında olması için yanma odası ile türbin kanatçıklarının da temiz ve aerodinamik yapısının bozulmaması istenmektedir.

Motor üzerinde sıcak bölge olarak tabir edilen bölgeler kompresör, yanma odası ve türbin kısımlarıdır. Özellikle yanma odası 1100°C'lere kadar dayanıklı yapıya sahiptir (Aydınmakina, 2014). Motor sıcak bölgelerinde, artan sıcaklık ve kirlenme olduğundan yorulmalar ve kılcal aşınmalar meydana gelecektir. Şekil 2'de gaz türbinli motorun kademeleri ve maruz kaldıkları sıcaklık/basınç grafikleri verilmiştir.



Şekil 2. Farklı kademelerdeki farklı sıcaklık ve basınç değişimleri (Aydınmakina, 2014).

Dusatko (2015), kompresör üzerinden yapılan yıkamanın etkisini, “Gaz Türbini Performansı İzleme” konulu makalesinde gaz türbinli bir Frame 7EA motoru üzerinde analiz etmiştir. Bu ölçümde uygun yazılım kullanılarak kompresör giriş sıcaklığı (CIT) ve kompresör çıkış basıncı (CDP) değerlerinin yer aldığı karşılaştırmalı bir grafik elde etmiştir (Şekil 3).

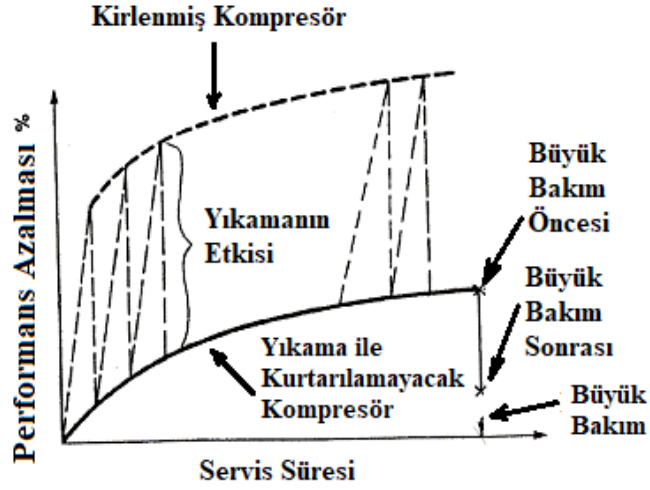


Şekil 1. Kompresörü yıkanmamış ve yıkanmış gaz türbin motoru değerleri (Dusatko,1995).

Dusatko'nun elde ettiği grafikte aynı CIT değerinde yıkanmış kompresör ile yıkanmamış kompresörün CDP değerleri arasındaki fark 0.138bar (2psig) civarındadır. Çalışması sonucunda, sabit kompresör giriş sıcaklığında yıkanmamış kompresörün daha düşük gaz basıncına sahip olduğu görülmüştür.

Varelis (2007), tez çalışması kapsamında Askeri gaz türbini motorları için motor bozunması ve kompresör yıkamasının teknoekonomik incelemesini gerçekleştirmiştir. Çalışmasında T56–A-15 ve F110–GE–129 olmak üzere daha çok askeri sektörde kullanılan gaz türbinli motorlardaki verim ve performans üzerindeki düşmeyi incelemiştir. Motorlardaki kirlenme sebepleri olarak korozyon, termal bozulma, yabancı madde hasarı ve motor çalışma koşulları olacağını ifade etmiştir. Bu kirlenmenin etkileri olarak kompresör akış kapasitesi, türbin kanatçıklarının akış kapasitesi, yanma verimliliği ve egzoz akış kapasitesinin olumsuz etkileneceğini, kirlenme sonucunda ise motorun shaft gücünde, yakıt akışında ve motor parçalarında aşırı sıcaklık/basınç farklılıkları meydana gelebileceğini ifade etmiştir.

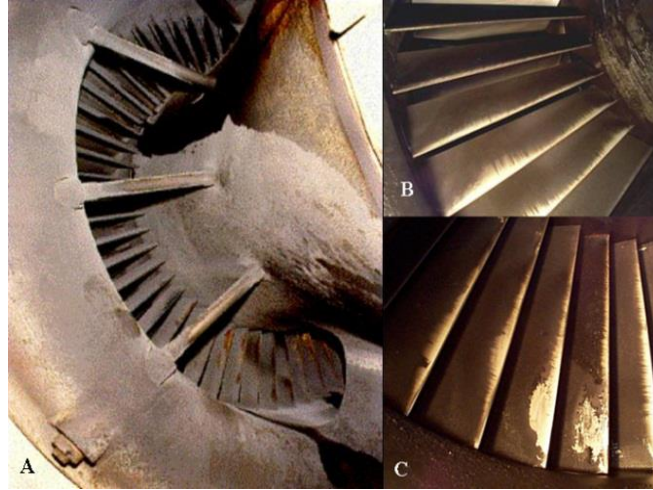
Şekil 4'de Li ve Singh'e gelişmiş bir gaz türbini gaz yolu teşhis sistemi- PYTHIA konulu çalışmalarında servis süresi ve performans eğrileri üzerine araştırma yapmışlardır (Li ve Singh, 2005).



Şekil 2. Bir Gaz Türbin Motorunun Tipik Kirlenme-Performans Eğrisi (Li ve Singh, 2005).

Şekil 4 dikkate alındığında kirli kompresör, büyük bakıma kadar zamanında yıkanırsa performanstaki azalma istenilen seviyelerde korunabilirken, büyük bakım sonrasında yıkama yapılmayan motorda ise servis süresinin kısalmaya başladığını göstermektedir. Bu durum motor yıkamasının önemini ifade etmektedir.

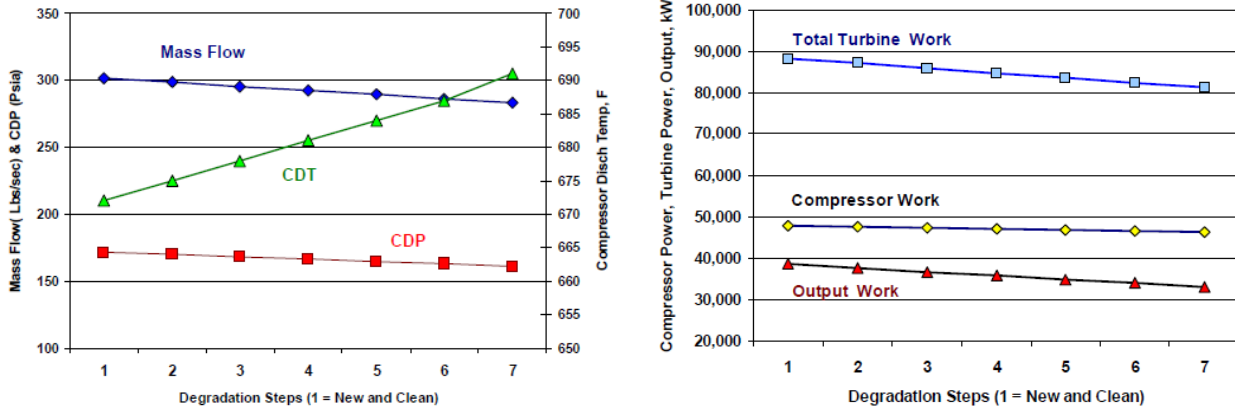
Meher-Homji ve ark.(2013), Gaz türbini performans bozulması ve kompresör yıkamasını ele almışlardır. Çalışmalarına ait Şekil 5’de farklı kirlilik durumlarındaki kompresörler görülmektedir.



Şekil 3. A) kirli havanın olduğu ortamda çalışan bir kompresör, B) bünyesel yağ kaçağının olduğu kompresör, C) Tuzlu hava ve yağ karışımı sonrasında meydana gelen kompresör kirlenmesi (Meher-Homji ve ark.(2013))

Gaz türbini performansı üzerinde kompresör kirlenmesinin etkilerini araştırmak için 40 MW’lık gaz türbininde GTPRO yazılımı kullanarak simülasyon çalışmalarını tamamlamışlardır. Çalışma sonucunda, kirlenme ile kompresör içerisindeki akan hava kütlelerinin azaldığı, kompresör

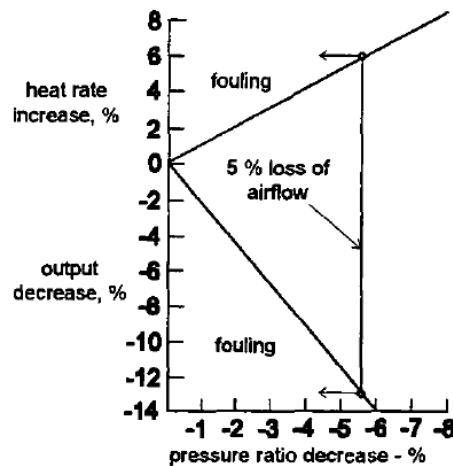
çıkış sıcaklığının arttığı ve kompresör çıkış basıncının azaldığını gözlemlemiştir. Şekil 6'da çalışmalarında yaptıkları simülasyon sonrasında elde edilen grafikler görülmektedir.



Şekil 4. GTPRO simülasyon sonuçları (Meher-Homji ve ark., 2013).

Tarabrin ve ark. (2014), farklı ortam ve farklı başlangıç parametreleri ile eksenel kompresör tıkanmasının gaz türbini ünite performansına etkisini ele almışlardır. Çalışmalarında kompresör kirlenmesine sebep etkenleri toprak tozu, nehir, deniz, polen ve tohumlar, trafikten kaynaklanan atık ürünler, motora ait bünyesel yataklardan gelen yağ kaçaqları vb. şeklinde olabileceğini ifade etmişlerdir. Kompresörde meydana gelen kirlenme sonrasında hava akış kütlelerinin azaldığı, basınç oranının azaldığı akabinde türbin veriminin düşeceğini ifade etmişlerdir. Türbin veriminin düşmesi sonucunda yakıt tüketiminin artacağını belirtmişlerdir.

Şekil 7'de, Hoeft'in çalışması sonucunda elde ettiği kompresör kirlenme etkileri görülmektedir (Hoeft, 1993). Çalışmasında, kirlenme ile beraber ısı oranındaki artışın ve çıkıştaki azalmanın basınç oranındaki düşüşe göre değişimi ifade edilmiş ve %5 hava akış kaybı için değerler işaretlenmiştir.



Şekil 5. Kompresör kirlenmesinin etkileri (Hoeft, 1993).

Igie (2017), Gaz türbini kompresörü, güç ve havacılık tahrikinde kirilenme ve yıkama konulu çalışmasında gaz türbinli motorlardaki kirilenmeyi, kirilenmeye sebep olan etkenleri ve kompresör yıkama çeşitlerini incelemiştir. Motorda ki kirilenme sebebi olarak; uçağın uçtuğu havaalanının konumu (çöl/deniz kıyısı), kalkış/iniş sayısı, atmosferik ve mevsimsel değişiklikler, uçuş yolu rotasının etken olabileceğini dile getirmiştir. Kirilenme sonrasında yakıt akışının artacağı, gerekli itme kuvvetinin ve kompresör çıkışındaki basıncın düşeceği, türbin girişindeki sıcaklığın aşırı artacağı ve türbin kanatçıklarının ömrünün azalacağını ifade etmiştir.

Motordaki bu kirilenmeler için Igie çeşitli motor yıkama türlerini incelemiştir. Bunlardan ilki motor sadece marş motoru vasıtasıyla maksimum devrin %10-20' si kadar dönüş sağlanarak kompresör girişinden yıkama yapılmasıdır. Bunun adı sıvı enjeksiyonlu yıkamadır. Sıvı enjeksiyonlu yıkamada, yıkama sıvısı bir enjektör vasıtasıyla kompresör girişine püskürtülerek yapılmaktadır (URL-2). Şekil 8'de sıvı enjeksiyonlu yıkama görülmektedir.



Şekil 6. Sıvı Enjeksiyonlu Motor Yıkaması (URL-2)

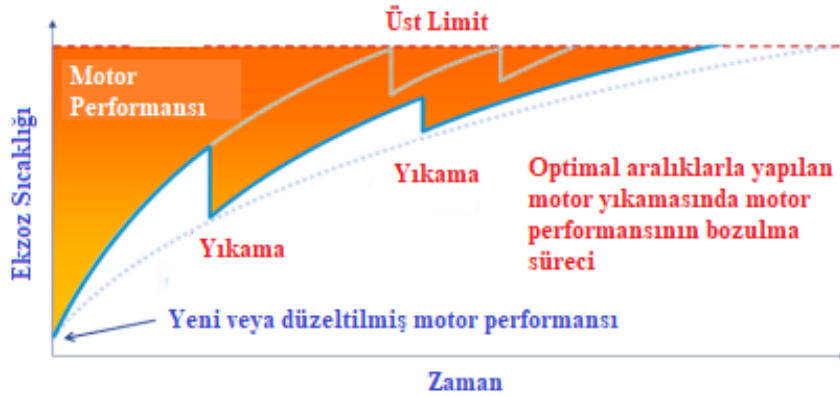
Diğer yıkama yöntemi ise aşındırıcı püskürtülmesiyle yapılan yıkama yöntemidir (Abrasive Blasting). Bu yöntemde aşındırıcı olarak pirinç, fındık kabuğu, ceviz kabuğu veya sentetik reçine parçacıkları kullanılabilir (Igie, 2017). Şekil 9'da aşındırıcı püskürtme yöntemi gösterilmektedir.



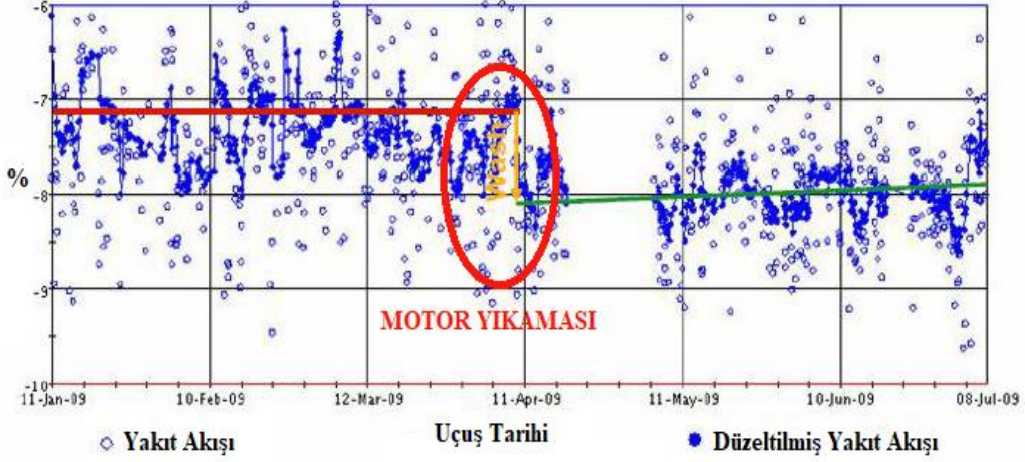
Şekil 7. Aşındırıcı Püskürtme Yöntemi (Igie, 2017).

Naeem (2008), Turbofan motora sahip askeri uçağa ait düşük basınçlı (LP) kompresör kirlenmesinin operasyonel etkinliğini irdelemiştir. Çalışmasında bir askeri uçağın görev profiline göre bilgisayar simülasyonu kullanarak alçak basınç kompresöründe kirlenme meydana gelen motorun karışılacağı sonuçları incelemiştir. Gaz türbin motorlarda meydana gelen kirlenmelerin %70-85'i kompresöre atfedilirken meydana gelen kirlenme kompresör sıcaklığını 15°C'ye kadar artmasına neden olabilmektedir. Kompresör kanatçıklarında meydana gelen kirlenmeler aerodinamik yapıyı bozarak hava akış kapasitesini azaltacaktır. Bu bağlamda motordan elde edilen güç azalacak, verim düşecek ve yakıt tüketimi artacaktır. Verimlilik ve akan hava kütlelerinde meydana gelen azalma motor performansının azalmasına sebep olacaktır. Azalan performans sonrasında motor türbin giriş sıcaklığı değerini koruyabilmek için dönüş hızını arttırmaya çalışarak kendi ömrünü ve işletme maliyetini arttıracaktır (Naeem, 2008).

Akkor (2015), yüksek lisans tezinde Jet motoru hava kanalları yıkama sistemi tasarımı ve otomasyonu isimli çalışmayı tamamlamıştır. Çalışmasında kompresör üzerinden yapılan yıkama yöntemleri ile yakıt sarfiyatının ve egzoz gaz sıcaklığının (EGT) düşeceğini dile getirmiştir. Tezinde vermiş olduğu CleanCore firmasına ait yıkama sistemi sonrası EGT ve Cyclean yıkama sistemi kullanıldıktan sonra Airbus firmasına ait yakıt sarfiyatındaki azalma eğrileri Şekil 10 ve 11'de gösterilmektedir.



Şekil 80. Cleancore Firmasına ait Yıkama Sistemi Sonrası EGT (Akkor, 2015).



Şekil 91. Airbus Firmasına ait Yakıt Sarfiyatı (Akkor, 2015).

Bu çalışmada literatürden farklı olarak, T56 turboprop motor ele alınmış ve yıkama yönteminde 3 farklı durum olan: yıkama yapılmadan, kompresör önünden sıvı enjeksiyonlu ve hem kompresör hem de yakıt nozulları vasıtasıyla sıvı enjeksiyonlu yıkama işleminin deneysel sonuçları irdelenmiştir. Çalışma sonuçları ile literatürdeki bu yöndeki eksiklikleri giderilmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

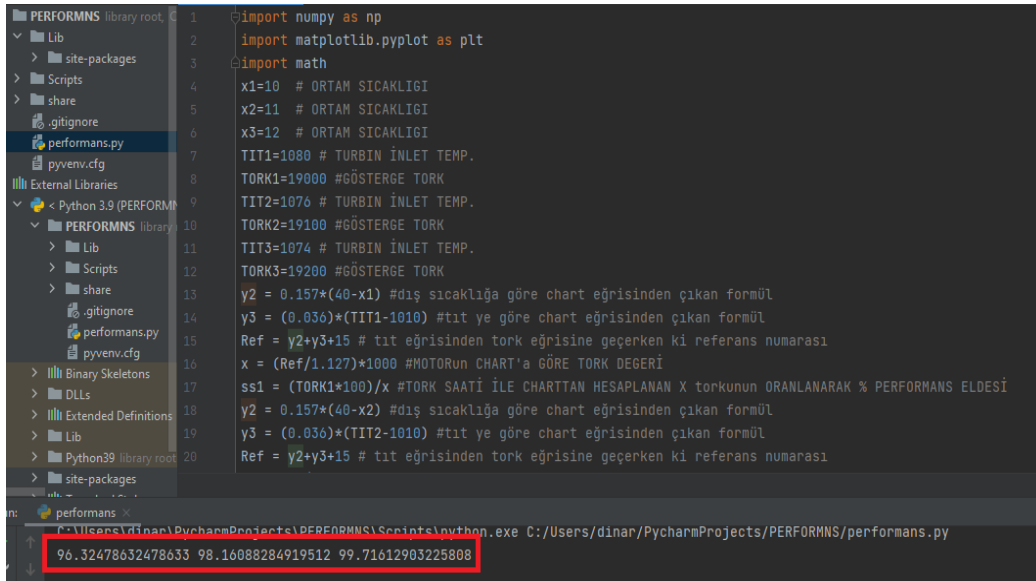
Araştırma esnasında havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan, Şekil 12'de ki yıkama cihazı kullanılmıştır. Kullanılan motor yıkama cihazı, basit olarak hava kompresörü, yıkama sıvısı ve durulama sıvısını içeren depodan oluşmaktadır. Basıncı bir tank vasıtasıyla basınçlandırılan yıkama sıvısı bir nozul vasıtasıyla kompresöre püskürtülmektedir. Çalışma esnasında uçak motor yıkama cihazı ile yakıt nozulu hattının bağlantısı için ara adaptör malzemesi kullanılmıştır. Ara adaptör, motor yıkama cihazı çıkış hattı ve yakıt nozullarının tümünün ortak noktası olan yakıt pompasına uyacak şekilde temin edilmiştir.



Şekil 102. Araştırmada Kullanılan Motor Yıkama Cihazı.

Yıkama cihazında basınçlandırılan yıkama sıvısı, yakıt pompasına ve buradan tüm yakıt nozullarına basınçlı şekilde dağıtılmaktadır. Yıkama esnasında motor kuru start yapılmış ve yakıt pompasının yakıt hattı ayrılmıştır. Yakıt yerine yıkama sıvısı nozullardan yanma odasına püskürtülmüştür. Kuru start esnasında kompresörden gelen basınçlı hava sayesinde yıkama mayisi türbin pallerinin tüm yüzeylerine kadar erişmiştir.

Araştırma esnasında türbin giriş sıcaklıkları T56 turboprop motor üzerinde kompresör çıkışı-türbin girişinde bulunan sıcaklık sensörleri vasıtasıyla ölçülmüştür. Motora ait tork değeri ise motor tork sensörü vasıtasıyla elde edilmiştir. Motor performans değeri ise Python yazılımı vasıtasıyla, T56 üretici firması tarafından yayınlanan performans tablosuna göre hesaplanmıştır. Maksimum performansı için %100 oranı referans alınmıştır. Bu oran üretici firmanın sağladığı performans chartına göre ortam sıcaklığı Türbin giriş sıcaklığı, tork değerleri kullanılarak hesaplanır. Performans tablosunda türbin giriş sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve motor tork değerleri kullanılmış, % Performans elde edilmiştir. Şekil 13'de python yazılımı ile yapılan performans hesabı ara yüzü görülmektedir. Python yazılım versiyonu olarak Python 3.9 çalışmada kullanılmıştır.



```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import math
4 x1=10 # ORTAM SICAKLIĞI
5 x2=11 # ORTAM SICAKLIĞI
6 x3=12 # ORTAM SICAKLIĞI
7 TIT1=1080 # TURBIN İNLET TEMP.
8 TORK1=19000 #GÖSTERGE TORK
9 TIT2=1076 # TURBIN İNLET TEMP.
10 TORK2=19100 #GÖSTERGE TORK
11 TIT3=1074 # TURBIN İNLET TEMP.
12 TORK3=19200 #GÖSTERGE TORK
13
14 y2 = 0.157*(40-x1) #dış sıcaklığa göre chart eğrisinden çıkan formül
15 y3 = (0.036)*(TIT1-1010) #tit ye göre chart eğrisinden çıkan formül
16 Ref = y2+y3+15 # tit eğrisinden tork eğrisine geçerken ki referans numarası
17 x = (Ref/1.127)*1000 #MOTORun CHART'a GÖRE TORK DEĞERİ
18 ss1 = (TORK1*100)/x #TORK SAATİ İLE CHARTTAN HESAPLANAN X torkunun ORANLANARAK % PERFORMANS ELDESİ
19 y2 = 0.157*(40-x2) #dış sıcaklığa göre chart eğrisinden çıkan formül
20 y3 = (0.036)*(TIT2-1010) #tit ye göre chart eğrisinden çıkan formül
21 Ref = y2+y3+15 # tit eğrisinden tork eğrisine geçerken ki referans numarası
```

Şekil 113. Python Performans Hesaplaması.

Araştırma esnasında üzerinde çalışılan T56 turboprop motora yapılan rutin baroskop kontrolünde yanma odası çıkış kısmının çatlak olduğu ve yanma odası, yakıt püskürtme nozulu ile türbin palelerinin çeşitli bölgelerinde kirlenmeler olduğu gözlemlenmiştir.

Bahse konu motor revizyondan yeni çıkmış, revizyona girmeden önce sadece kompresör üzerinden motor yıkaması yapılmış ve bakım çıkışı sonunda 47 saat çalıştırılmıştır. 47 saatlik bir motor çalışması, yıkaması yapılan ve 6000-8000 saat ömrü olan bir motor için çok az bir rakam

olması sebebiyle şüphe oluşturmuştur. Müteakiben hasar tespit edilen motorun geçmiş kayıtları incelendiğinde motorun limit harici yüksek sıcaklıkta çalıştırılmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca motor yıkamasının kompresör üzerinden sıvı enjeksiyon yöntemiyle yapılması ve servis süresince limit harici yüksek sıcaklıkta çalıştırılmaması etkin yıkama yapılamadığını göstermiştir.

Deneysel çalışmada kullanılan T56 turboprop motorunun muadil görseli Şekil 14’de sunulmuştur. T56 turboprop motor sabit devirli bir gaz türbini motorudur. T56 turboprop motorunun dakikadaki devri 13820 rpm, hava akışı 14,75 kg/sn’dir. Take off modunda motor 13820 rpm’de dönerken maksimum 2214,50 Nm tork sağlar. T56 turboprop motor çalışma esnasında hava alığından giren havanın 25%’ini yanma odasına ulaştırır, %47,6 yakıt hava karışımı oranı ile yanmayı gerçekleştirir (Lepourry, 1990). Geriye kalan 75%’lik hava ise 1080°C’ye ulaşan yanma odası ile yanma odası dış karteri arasında soğutma işlevi görmektedir.



Şekil 124. Araştırmada Kullanılan T56 Turboprop (URL-3).

Bu sebeple kompresör hava alığından gönderilen yıkama sıvısının 25%’lik kısmı yanma odası, püskürtme nozulları ve türbin kısmına ancak ulaşmaktadır. Bu oranlara göre sıvı enjeksiyonlu yıkama yönteminde 20lt sıvı kullanılmakta olduğunu varsayarsak bu sıvının ancak 5lt’si 6 adet yanma odasına ulaşabilmektedir. 5lt yıkama sıvısı 6 adet yanma odasına ayrıldığında bir yanma odasına sadece 0.83lt sıvı düşmektedir. Bu sıvı miktarının oluşan kirlenmeyi çözmek için yetersiz kaldığı görülmüştür.

Bunun üzerine yıkama yöntemi farklılaştırılarak hem kompresör hem de yakıt nozulları vasıtasıyla yanma odası ve türbine kadar yıkama sıvısı ulaştırılmıştır. Yakıt nozullarına bağlanan yıkama cihazı bünyesinde bulunan kompresör vasıtasıyla yıkama sıvısını basınçlandırarak yanma odasına göndermiştir. Bunun sonucunda her bir yanma odasına ve türbin kanatçıklarına oradan da egzoz kısmına kadar yıkaması sıvısı ulaşarak başarılı sonuç elde edilmiştir.

Yeni uygulanan sıvı enjeksiyonlu yıkama sonrası yapılan baroskop kontrollerinde türbin kanatçıkları ile yanma odaları görsel olarak kontrol edilmiş, kurum ve sülfidasyon atıklarının temizlendiği tespit edilmiştir. Kompresör önünden yapılan sıvı enjeksiyonlu yıkama esnasında yakıt nozulları neredeyse temizlenememekte bu durumda motor yakıt tüketimi artmaktadır. Şekil 15’de kompresör önünden yapılan sıvı enjeksiyonlu motor yıkamasına ilaveten yakıt nozullarına bağlanarak yapılan yıkama tekniği sonrası yakıt nozulları durumlarının temizlendiği görülmektedir.



Şekil 135. Yıkama yöntemi öncesi ve sonrası yakıt nozulları.

Şekil 16’de kirli/kurumlu yanma odasının baroskop görüntüleri ve yakıt nozullarından basınç altında gönderilen yıkama sıvısının yanma odasındaki kurum ve kiri çözdüğü görülmüştür.

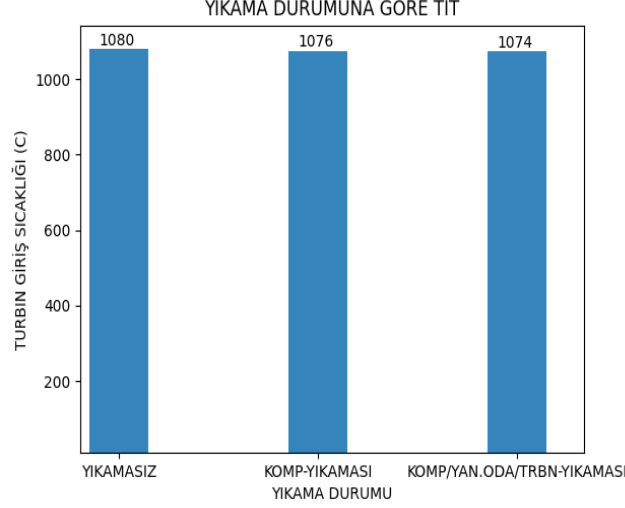


Şekil 146. Yıkama yöntemi sonrası yanma odası.

3. Bulgular

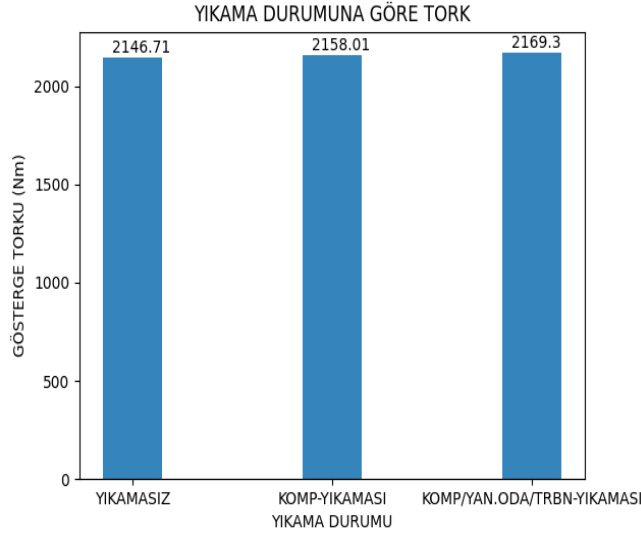
Çalışmada T56 turboprop motor yıkama yapılmadan, kompresör önünden sıvı enjeksiyonlu ve hem kompresör hem de yakıt nozulları vasıtasıyla sıvı enjeksiyonlu yıkama yapılarak üç farklı yıkama şekli için kıyaslanmıştır.

Motor take off pozisyonunda çalıştırılmış, farklı ortam sıcaklıkları ve aynı irtifa değerlerinde Türbin giriş sıcaklığı ve tork değerleri elde edilmiştir. Şekil 17’de motor yıkaması yapılmadan, sadece kompresör önünden sıvı enjeksiyonlu yıkama ve hem kompresör önünden hem de yakıt nozulları ile sıvı enjeksiyonlu yıkama yapılarak türbin giriş sıcaklığı ölçülmüştür.



Şekil 17. Yıkama-Türbin Giriş Sıcaklığı (TIT)Grafığı.

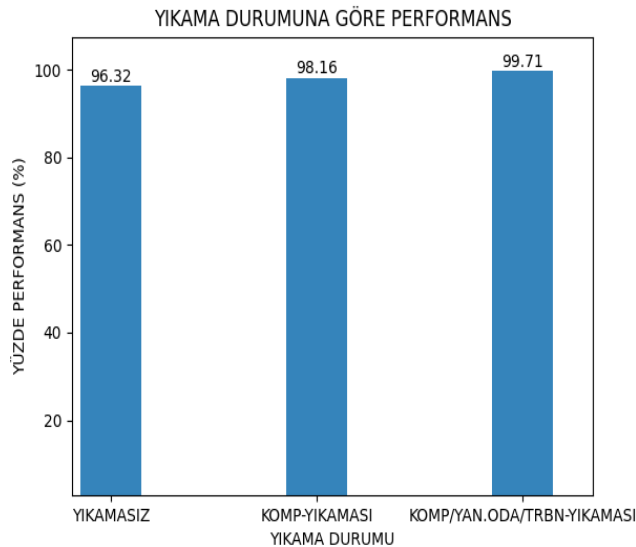
Yapılan yıkama konfigürasyonları kıyaslandığında yıkaması yapılmayan motorda türbin giriş sıcaklığı 1080°C iken kompresör yıkamasında 1076°C hem kompresör hem de yakıt nozulları ile yapılan motor yıkamasında ise 1074°C’ye düştüğü görülmüştür. Bunun sebebi kompresör, yanma odası ve türbinin üzerinde bulunan kirlenme, sülfidasyon vb. dış etkenlerin yıkama ile giderilmesi sonucu hava akış debisinin düzenli ve yeterli olmasıdır. Hava akışının düzenli olması sonucunda yanma odasında ki yanma reaksiyon verimi istenilen seviyede olmuştur. Bu düzenli hava akışı sonrasında istenilen tork değeri elde edilmiştir. Hava akış debisinin artması sonrasında soğutma havası artmış türbin giriş sıcaklığı değeri düşmesine sebep olmuştur.



Şekil 158. Yıkama-Tork Grafiği.

Şekil 18’de üç yıkama durumu için tork değerleri elde edilmiştir. Tork değerleri yıkama sonrasında artış göstermiştir. Bunun sebebi yıkaması yapılmayan motorda türbin giriş sıcaklığının yüksek olması sonucunda yakıtın motor kontrol ünitesi tarafından azaltılmasıdır. Bununla birlikte, kompresör ve türbin yıkaması yapılan motorda kanatçıklardaki hava akışının korunması sayesinde, türbin giriş sıcaklığının düşük olması sonucunda tork 2146,71 Nm’den 2169,3 Nm’ye yükselmiştir. Tork değerleri motor üzerindeki tork sensörü vasıtasıyla elde edilmiştir.

Şekil 19’de yıkama performans grafiği görülmektedir. Motor yıkaması sonrasında motor tork değerinin artması ve tork değeri ile motor performansının doğru orantılı olması sebebiyle %99,71 değerine kadar ulaşılmıştır.



Şekil 19. Yıkama-Performans Grafiği.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Motor üzerindeki kirlenmeler motoru bünyesel etkilediği gibi çevresel olarak da emisyon değerlerini, uçuş emniyetini negatif etkileyebilmektedir. Kompresör, türbin, yanma odası değişimlerinden başlayarak devam eden negatif etkiler motor değişimine kadar gidebilmektedir. Öte yandan kirlenme sonucu dayanımı azalan bir türbin parçası motorun kâl olmasına sebebiyet verip kaza-kırım durumlarına dahi sebebiyet verebilir.

Motordaki kirlenme, motorun verimi ve yakıt sarfiyatı üzerinde olumsuz etki oluşturabilmektedir. Meher-Homji et.al.(2013), kompresör önünden yapılan sıvı enjeksiyonlu motor yıkama yöntemi ile kompresörün ancak 6. kademesine kadar yıkama sıvısının erişebileceğini belirtmiştir. Ayrıca, Literatürdeki çalışmalardan işletme ve motorun görev profiline bağlı olarak belli periyotlarla yapılan motor yıkamasının yakıt sarfiyatı ve motor performansı üzerine olumlu etkileri olduğu görülmektedir (Meher-Homji, 2013; Igie, 2017; Varelis, 2013).

Bu çalışmada literatürden farklı olarak motor yıkama yönteminde kompresör, yanma odası, yakıt nozullarının püskürtme noktaları, yanma odası ve türbin paleleri etkin bir şekilde yıkanabilmektedir. Elde edilen sonuçlar T56 turboprop motor üreticisine ait performans tablosu (URL-4) referans alınarak Tablo 1’de üç farklı durum için sunulmuştur.

Tablo 1. T56 Motoruna Ait Değerler.

Paremetreler	Yıkamasız	Kompresör ile Yıkama	Kompresör ve Yakıt Nozulları ile Yıkama
Dış Sıcaklık (°C)	10	11	12
İrtifa(Ft)	3500	3500	3500
Türbin Giriş Sıcaklığı (°C)	1080	1076	1074
Tork (Nm)	2146,71	2158,01	2169,3
Performans (%)	96,32	98,16	99,71

Yakıt nozulları vasıtasıyla yapılan motor yıkaması sayesinde yıkama sıvısının kompresör haricinde yanma odası ve türbin kanatçıklarına tam ulaştığı görülmüştür. Motor türbin giriş sıcaklığı değerinin düşmesi sonucu sıcak yüzey malzemeleri ısıl strese maruz kalmayacak ve ömürleri uzayacaktır. Motor tork değerinin artması sonucu motor performans değerleri artacaktır. Kompresör ve yakıt nozulları ile yıkamada yıkamasız duruma göre yaklaşık %3.39 iyileşme elde edilmiştir.

Yazarların Katkısı

Çalışmada her iki yazar da eşit oranda katkı sunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada, araştırma ve yayın etiğine dikkat edilmiştir.

Kaynaklar

- Akkor, H., (2015). Jet motoru hava kanalları yıkama sistemi tasarımı ve otomasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aydinmakina, F., (2014). Jet Motoru Türbin Kanatçıklarının Alüminit Kaplamalarının Element Hareketlerinin İncelenmesi. *Doktora Tezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir
- Dusatko, R.A., (1995). Monitoring Gas Turbine Performance. *Power Engineering*, Cilt 99, Sayı 10.
- Hoefl, R.F. (1993). Heavy Duty Gas Turbine Operating and Maintenance Considerations. *GER-3620B*, GE I&PS.
- Meher-Homji, C., Bromley, A.F., Stalder, J.P., (2013). Gas turbine performance deterioration and compressor washing. *In Proc. of the 2nd Middle East Turbomachinery Symposium*, Doha, Qatar. Texas A&M Üniversite Kütüphanesi.
- Igie, U., (2017). Gas turbine compressor fouling and washing in power and aerospace propulsion. *Journal Engineering for Gas Turbines Power*, Cilt 139, Syf. GTP-17-1147.
- Lepourry, P., (1990), Le Turbopropulseur, 3rd ed. *Ecole Nationale De L'Aviation Civile (ENAC)*, Fransa, 172. Syf.
- Li, Y.G. & Singh R., (2005). An advanced gas turbine gas path diagnostic system- PYTHIA, *in 17th International Symposium on Air Breathing Engines*, Munich, Germany
- Naeem, M (2008). Impacts of low-pressure (LP) compressors' fouling of a turbofan upon operational-effectiveness of a military aircraft. *Applied Energy*, Cilt 85, Syf. 243-270.
- Tarabrin, A. P., Schurovsky, V. A., Bodrov, A. I., Stalder, J.-P., (2014). Influence of axial compressor fouling on gas turbine unit performance based on different schemes and with different initial parameters. *The American society of mechanical engineers*, Cilt 4, Syf. 98-GT-416.
- Varelis, A.G., (2013). Techno economic study of engine deterioration and compressor washing for military gas turbine engines. *Thesis*. Cranfield University.
- URL-1: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Turboprop> (Erişim Tarihi: 01 Haziran 2021).
- URL-2: <https://sassofia.com/blog/aircraft-core-engine-washing/> (Erişim Tarihi: 13 Ocak 2021).
- URL-3: <https://assets.skiesmag.com/wp-content/uploads/2017/01/T56-on-wing-c-Vector-resized-768x510.jpg> (Erişim Tarihi: 12 Ocak 2021).
- URL-4: <https://www.scribd.com/document/507728960/1C-130H-2-70GS-00-1-8> (Erişim Tarihi: 05 Haziran 2021).