

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UÇAK GÖVDE MOTOR BAKIM ANABİLİM DALI**

**UÇAK MOTORLARI ÜZERİNDE FAN BLADE AĞIRLIK
DENGELENMESİ VE CF6 MOTORLARINDA
UYGULANMASI**

**Hazırlayan
Osman İlker AÇIKGÖZ**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Selim TANGÖZ**

Yüksek Lisans Tezi

**Şubat 2024
KAYSERİ**

T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UÇAK GÖVDE MOTOR BAKIM ANABİLİM DALI

UÇAK MOTORLARI ÜZERİNDE FAN BLADE AĞIRLIK
DENGELENMESİ VE CF6 MOTORLARINDA
UYGULANMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Osman İlker AÇIKGÖZ

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Selim TANGÖZ

Şubat 2024
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Osman İlker AÇIKGÖZ

“Uçak Motorları Üzerinde Fan Blade Dengelenmesi ve CF6 Motorlarında Uygulanması” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Osman İlker AÇIKGÖZ

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Selim TANGÖZ

Uçak Gövde Motor Bakımı ABD Başkanı

Doç. Dr. Veysel ERTURUN

Dr. Öğr. Üyesi Selim TANGÖZ danışmanlığında **Osman İlker AÇIKGÖZ** tarafından hazırlanan “**Uçak Motorları Üzerinde Fan Blade Dengelenmesi ve CF6 Motorlarında Uygulanması**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Uçak Gövde Motor Bakımı** Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

Gün / Ay / Yıl

JÜRİ:

:

:

.....

.....

.....

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun tarih vesayılı kararı ile onaylanmıştır.

...../...../.....

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca ilgisini ve değerli bilgilerini benden esirgemeyen çok değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Selim TANGÖZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca eğitim süreci boyunca manevi desteklerini her zaman hissettiğim canım oğullarım Çınar ve Aras Ali ile sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Osman İlker AÇIKGÖZ

Şubat 2024, KAYSERİ

UÇAK MOTORLARI ÜZERİNDE FAN BLADE DENGELENMESİ VE CF6 MOTORLARINDA UYGULANMASI

Osman İlker AÇIKGÖZ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Şubat 2024
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Selim TANGÖZ

ÖZET

Aerodinamik ve yapısal mekaniğin, uçakların ve uçuş araçlarının geliştirilmesinde önemli bir etkisi olmuştur. Modern bir turbofan motorunun birçok komponentleri arasında, fan kanatçıkları özellikle önemlidir. Fan kanatçıkları dönüş sırasında titreşimlere maruz kalmaktadır. Bu titreşimler azaltılıp belirli limitler altına alınmazsa uçakta yapısal hasarlara varan ciddi sonuçlara sebep olabilmektedir.

Bu çalışmada motor ara yüzü ve vibrasyon ünitesi tarafından tespit edilen yüksek vibrasyon değerine sahip bir GE CF6 motorunun fan blade dengelenmesi ve fan blade yağlanması uygulanarak vibrasyondaki değişimler gözlemlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Elde edilen veriler incelendiğinde fan blade dengeleme işleminin vibrasyonda %78,1'e kadar bir düşüşe neden olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmada elde edilen veriler, blade ağırlık dengeleme ve yağlama işlemlerinin vibrasyon değerlerini düşürmede ne derece etkili olduğunu, harcanan adam/ saatin maliyetinin ve işlem sırasında harcanan zaman ile karşılaştırılarak, bakım kuruluşları için en etkili ve verimli yöntemin tespiti için bir yol gösterici olacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fan blade, Vibrasyon, Motor ara yüzü ve vibrasyon görüntüleme ünitesi, GE CF6 motorları

FAN BLADE BALANCING ON AIRCRAFT ENGINES AND ITS APPLICATION ON CF6 ENGINES

Osman İlker AÇIKGÖZ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master Thesis, February 2024
Supervisor: Asst. Prof. Selim TANGÖZ

ABSTRACT

Aerodynamics and structural mechanics have had a significant impact on the development of aircrafts and flight vehicles. Among the many components of a modern turbofan engine, fan blades are particularly important. Fan blades are subjected to vibrations during rotation. If these vibrations are not reduced and kept within certain limits, they may cause serious consequences, including structural damage to the aircraft.

In this study, the changes in vibration of a GE CF6 engine with high vibration values detected by the engine interface and vibration unit were observed and compared by applying fan blade balancing and fan blade lubrication.

When the obtained data is analyzed, it is seen that the fan blade balancing process causes a decrease of up to 78.1% in vibration. It is evaluated that the data obtained in the study will be a guide for determining the most effective and efficient method for maintenance organizations by comparing the effectiveness of blade weight balancing and lubrication processes in reducing vibration values, the cost of man/hour spent and the time spent during the process.

Keywords: Fan blade, Vibration, Engine interface vibration monitoring unit, GE CF6 engines,

İÇİNDEKİLER

UÇAK MOTORLARI ÜZERİNDE FAN BLADE DENGELENMESİ VE CF6 MOTORLARINDA UYGULANMASI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

LİTERATÜR ÖZETİ, AMACI VE ÖNEMİ

1.1. Literatür Özeti.....	2
1.2. Tezin Amacı	7
1.3. Hipotez	10

2. BÖLÜM

CF6 MOTORLARININ VE FAN KANATÇIKLARININ GENEL YAPISI

2.1. CF6 Motorlarının Genel Yapısı	12
2.2. CF6 Motorlarının Çalışma Limitleri.....	14
2.2.1. Eksoz Gaz Sıcaklığı.....	14
2.2.2. Dakikadaki Devir Sayısı	15
2.2.3. Yağ Basınç Ve Tüketim Değerleri	17
2.3. CF6 Motorların Fan Kanatçıkları.....	18
2.4. CF6 Motorlarında Fan Kanatçıkları Titreşim Ve Nedenleri.....	20
2.4.1. Vibrasyon Nedenleri	21

3. BÖLÜM

FAN KANATÇIKLARI VE KANATÇIKLARDA MEYDANA GELEN VİBRASYON ÜZERİNE YAPILAN ULUSLARARASI ÇALIŞMALAR

3.1. Akustik Kara Boşluk Etkisi	24
3.2. Fan Kanatçığı Dizayn ve Yapısal Analizi Üzerine Yapılan Çalışma.....	25
3.3. Motor Bağlantısı ve Vibrasyon Kontrolü Üzerine Yapılan Örnek Bir Çalışma	30
3.4. Titreşim Davranışına Odaklanarak Kompozit Kanat Tasarımı ve Testi Üzerine Yapılan Bir Çalışma.....	32
3.5. Kompozit Bir Kanadın Titreşim ve Sönümlenme Analizi Üzerine Yapılan Bir Çalışma.....	34
3.6. Sürtünme Kaynaklı Kompozit Fan Kanadı Titreşimlerinin ve Aşınabilir Kaplamanın Çıkarılmasının Sayısal İncelenmesi	35
3.7. Dönen Kompozit Fan Kanatlarının Piezoelektrik Titreşim Sönümlenme Kontrolü İçin Sayısal Modelleme Yöntemi ve Deneysel Çalışma	37

4. BÖLÜM

FAN KANATÇIKLARI TİTREŞİM TESPİTİ VE GİDERİLME YÖNTEMLERİ

4.1. Vibrasyon Tespit Yöntemi.....	40
4.1.1. N1 ve N2 Vibrasyon Sensörleri.....	41
4.1.2. N1 ve N2 Hız Sensörleri.....	41
4.1.3. Motor Ara yüzü ve Vibrasyon İzleme Ünitesi	41
4.1.4. Uzaktan dönüştürücü	42
4.2. Vibrasyon Giderme Yöntemleri.....	43
4.2.1. Fan Kanatçıkları Orta Açıklı Bölgesi Yağlaması.....	43
4.2.2. Fan Kanatçıklarının Tam Set Yağlanması	44
4.2.3. Yerde Balans Ayarlama.....	45
4.2.4. Fan Kanatçıklarının Ağırlıklarına Göre Yeniden Ayarlanarak Takılması.....	47

5. BÖLÜM

GE CF6 MOTORLARINDA BALANS DENGELERİ VE YAĞLAMA İŞLEMLERİ İLE VİBRASYON GİDERME UYGULAMASI

5.1. Yüksek Vibrasyona Sahip Bir GE CF6 Motor Modeli.....	49
5.2. Balans Denge Ağırlık Vidaları Kullanılarak Vibrasyon Düşürme	53
5.3. Fan Kanatçıklarının Yağlanması İle Vibrasyon Düşürme	62

6. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuç	69
------------------	----

6.2. Öneriler	71
KAYNAKÇA	72
ÖZGEÇMİŞ.....	75



KISALTMALAR

AMM	: Uçak bakım dokümanı
BEM	: Fan kanadı elmanı momenti
CFRP	: Karbon elyaf takviyeli plastik
CRF	: Kompresör arka çerçevesi
ECU	: Motor kontrol ünitesi
EGT	: Eksoz gaz sıcaklığı
EIVMU	: Motor ara yüzü ve titreşim görüntüleme ünitesi
EWD	: Motor uyarı göstergesi
FF	: Yakıt akışı
FOD	: Yabancı madde hasarı
FRPC	: Fiber takviyeli polimer kompozit
HCF	: Yüksek çevrimli yorulma
IPS	: Saniyede inç birimi
LE	: Hücum kenarı
MCDU	: Çok amaçlı kontrol ve gösterge ünitesi
MILS	: Milli İnç
MOE	: Bakım organizasyon el kitabı
N1	: Düşük basınç rotoru
N2	: Yüksek basınç rotoru
RCC	: Uzaktan dönüştürücü
RPM	: Dakikadaki dönüş hızı
TE	: Firar kenarı
TOT	: Türbin çıkış sıcaklığı
TSM	: Arıza giderme dokümanı
VIB1	: Düşük basınç rotoru vibrasyonu
VIB2	: Yüksek basınç rotoru vibrasyonu

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. N1 limitleri.....	21
Tablo 5.1. EGT ve FF değerleri karşılaştırma	68



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	CF6 Titanyum ve Genx kompozit fan kanatçığı	4
Şekil 1.2.	Motorlarda meydana gelen vibrasyonun gövdeye iletilmesi.....	5
Şekil 1.3.	Denge vidalarının konumu	9
Şekil 1.4.	MCDU ekranında gösterim	10
Şekil 2.1.	CF6 motor modülleri.....	12
Şekil 2.2.	N1 ve N2 şaftları	13
Şekil 2.3.	EGT probes	14
Şekil 2.4.	Motor uyarı göstergesi	15
Şekil 2.5.	N1 ve N2 devirlerinin gösterimi.....	16
Şekil 2.6.	N1 trend ve limitleri	16
Şekil 2.7.	Yağ basıncı ve miktarının ekranda gösterimi.....	17
Şekil 2.8.	CF6 motoru fan modülü	18
Şekil 2.9.	CF6 fan kanatçığı	19
Şekil 2.10.	Orta açıklık yapısı	19
Şekil 2.11.	Sistem Göstergesi N1 Vibrasyon Gösterimi	20
Şekil 2.12.	İvmeölçer A.....	21
Şekil 2.13.	İvmeölçer B	22
Şekil 2.14.	Motor Ara Yüzü Vibrasyon Görüntüleme Ünitesi	22
Şekil 3.1.	Fan kanatçığı yapısı.....	27
Şekil 3.2.	Titanyum hücum kenarına sahip kompozit fan kanatçığı	28
Şekil 3.3.	Simülasyon ve deneysel sonuçları	37
Şekil 3.4.	Piezoelektrik yamaların fan kanatçığı yüzeyine montajı	39
Şekil 4.1.	Vibrasyon görüntüleme sistemi.....	40
Şekil 4.2.	Vibrasyon görüntüleme mimari yapısı	42
Şekil 4.3.	Yağlama için kullanılan kimyasal	44
Şekil 4.4.	MCDU ekranında denge vidaları konum gösterimi.....	46
Şekil 4.5.	Balans denge vidalarının yeri	46
Şekil 4.6.	Balans denge vidaları	47
Şekil 4.7.	Fan kanatçığı bilgileri.....	47
Şekil 4.8.	Fan kanatçığı değişim tablosu	48

Şekil 5.1. Bakım girişi N1 devirlerine göre vibrasyon değerleri.....	50
Şekil 5.2. Bakım girişinde ölçülen vibrasyon değeri.....	50
Şekil 5.3. Bakım girişi N1 devrine göre vibrasyon değişim grafiği.....	51
Şekil 5.4. Bakım girişi EGT ve FF değerleri.....	51
Şekil 5.5. N1 MCDU-ECAM değerleri.....	52
Şekil 5.6. N2 MCDU-ECAM değerleri.....	53
Şekil 5.7. Trim balans MCDU ulaşımı.....	55
Şekil 5.8. MCDU ağırlık denge vidaları pozisyonu	56
Şekil 5.9. Denge vidaları	57
Şekil 5.10. Denge vidaları takımı	57
Şekil 5.11. Denge ağırlık vidaları özellikleri.....	58
Şekil 5.12. Balans vidaları serifikası.....	59
Şekil 5.13. Balanslama sonrası N1 devirlerine göre vibrasyon değerleri.....	60
Şekil 5.14. Balanslama sonrası N1 VIB değeri	60
Şekil 5.15. Balanslama sonrası vibrasyon değişim grafiği.....	61
Şekil 5.16. Balanslama sonrası EGT ve FF değerleri.....	61
Şekil 5.17. Kullanılan yağlayıcı kimyasal	63
Şekil 5.18. Fan kanadı kök kısmının yağlanması	64
Şekil 5.19. Bağlantı elemanları yağlanması	64
Şekil 5.20. Orta açıklık bölgesinin yağlanması	65
Şekil 5.21. Fan kanadı takım mimarisi.....	65
Şekil 5.22. Fan kanatçıkları yağlama sonrası N1 devirlerinde vibrasyon değerleri.....	66
Şekil 5.23. Yağlama işlemi sonrası N1 VIB değeri.....	66
Şekil 5.24. Fan kanatçıkları yağlama sonrası vibrasyon değişim grafiği	67
Şekil 5.25. Fan kanatçıkları yağlaması sonrası EGT ve FF değerleri	67
Şekil 5.26. Vibrasyon değişimleri	68

GİRİŞ

Günümüzde önemli bir yere sahip olan havayolu taşımacılığı gerek zamandan kazanç gerekse güvenilirliği bakımından oldukça sık tercih edilen bir ulaşım yöntemidir. Bu nedenle havayolu ulaşımını sağlayan modern ticari yolcu uçaklarının bakımı oldukça önemlidir. Uçakların en önemli modüllerinden birisi olan turbofan motorlarının her zaman yüksek performans ve verimlilikle çalışması beklenir.

Güvenli ve verimli bir uçağın, uçuş süreci boyunca, uçuşun bütün fazlarında en iyi performans verilerini vermesi beklenmektedir. Neredeyse her bir parçası farklı özellik, performans ve güvenlik özelliklerine sahip sayısız parçanın, birbiriyle uyum içinde çalışabilen motorların tasarlanması yüksek bir mühendislik gereksinimi gerektirmektedir.

Bu turbofan motorlarının performansını ve verimliliğini düşüren etmenlerin başında vibrasyondan bahsedilebilir. Yüksek vibrasyon altında çalışan motor parçaları bir süre sonra görevini yerine getiremeyecek şekilde bozulacak hatta motorda yapısal hasara varan sonuçlar doğurabilecektir. Bu hiçbir zaman istenmeyen bir durumdur.

Günümüz ticari türbin motorların ekonomik verimliliğini arttırmak hem de çevreye vermiş olduğu zararı azaltılmasının yanı sıra güvenilirliğinin de artırılması büyük önem arz etmektedir. Yüksek hızlarda dönen fan kanatçıklarının performanslarının gelişmesi, motordaki gürültü ve vibrasyonun azaltılması yüksek mekanik ve dinamik yenilikler gerektirmektedir.

Vibrasyonun az olması hem yolcu sağlığı hem de uçak ve motor performansı açısından son derece önemlidir. Bunun için turbofan motorlarını çalışma ömürleri boyunca vibrasyon limitlerinde tutmak gereklidir. Gerek rutin bakımlarda gerekse rutin dışı bakımlarda vibrasyonun olduğu ana komponent olan fan kanatçıklarının bakım ve kontrol uygulamaları yapılarak vibrasyon limitler dahilinde tutulabilir.

1. BÖLÜM

LİTERATÜR ÖZETİ, AMACI VE ÖNEMİ

1.1. Literatür Özeti

Günümüz teknolojisindeki gelişmelerin, uçakların ve uçuş araçlarının geliştirilmesinde önemli etkileri olmuştur. Modern bir turbofan motorunun en önemli parçalarından birisi fan kanatçıklarıdır. Fan kanatçıkları dönüş sırasında titreşimlere maruz kalmaktadır. Bu titreşimler azaltılıp belirli limitler altına alınmazsa uçakta yapısal hasarlara varan ciddi sonuçlar doğurabilmektedir.

Uçuş ekibi ve yolcular tarafından da kolaylıkla hissedilebilen yüksek titreşimin insan vücudu üzerinde olumsuz etkileri vardır. Yorgunluk ve stres bunlara örnek olarak verilebilir. Ayrıca motorda meydana gelen yüksek vibrasyon uçağa da iletceği için uçak sistemlerinin doğru ve düzgün bir şekilde çalışmasına engel olabilmektedir [1].

Günümüz ticari türbin motorların ekonomik verimliliğini arttırmak hem de çevreye vermiş olduğu zararı azaltılmasının yanı sıra güvenilirliğinin de artırılması büyük önem arz etmektedir. Yüksek hızlarda dönen fan kanatçıklarının performanslarının gelişmesi, motordaki gürültü ve vibrasyonun azaltılması yüksek mekanik ve dinamik yenilikler gerektirmektedir [2].

Güvenli ve verimli bir uçağın, uçuş süreci boyunca, uçuşun bütün fazlarında en iyi performans verilerini vermesi beklenmektedir. Neredeyse her bir parçası farklı özellik, performans ve güvenlik özelliklerine sahip sayısız parçanın, birbiriyle uyum içinde çalışabilen motorların tasarlanması yüksek bir mühendislik gereksinimi gerektirmektedir. Bu bileşenler arasında önemli parçalardan birisi olan motor fan kanatçıkları, günümüz modern ticari yolcu uçaklarında kullanılan önemli bir bileşendir. Yüksek dönüş hızlarında çalışırken hem termal hem de mekanik yüklere maruz kalmaktadırlar [3].

Bu yükler altında çalışırken yapısal hasara uğramamak için dayanıklılık ve sağlamlık istenmektedir. Çünkü herhangi bir yapısal hasar motorda hem yüksek vibrasyona sebep olabilmekte hem de motor ve uçakta tehlikeli boyutta hasarlara neden olabilmektedir. Yüksek by pass oranına sahip turbofan motorların hafif tasarımının geliştirilmesinde geniş çaplı fan kanatçığının yüksek emiş gücünün tasarlanması, dayanıklılık, titreşim ve yabancı madde çarpması gibi etkenler göz önüne alınarak tasarlanmaktadır [4].

Bütün bu etkenler göz önünde bulundurulduğunda tasarımın mükemmel olması beklenmektedir.

Geçmişten günümüze fan kanatçıkları birçok farklı malzemelerden üretilmiş, yıllar içinde hem ağırlık-dayanıklılık oranının hem de performans oranının iyileştirilmesi için birçok çalışmada bulunulmuştur. CF6 motorlarında toplamda 34 adet fan kanatçığı bulunmaktadır. Hem güç ve sağlam olması için hem de hafif olması açısından fan kanatçıkları titanyumdan üretilmiştir [5].

Kompozit yapıda fan kanatçıkları tasarımı hiç şüphe yok ki fan kanatçıkları tasarımda çok önemli bir gelişmedir.

Titanyum yapısı kompozit malzemelere oranla 2,5 kat daha fazla yoğunluğa sahiptir. Buna rağmen 3 katı daha fazla ağırlığa sahiptir. Gelişen tasarım teknolojileri ile kompozit yapıda üretilen fan kanatçıkları hem sertlik hem de daha sıkı tutunma sağlayarak verimliliği arttırmakta ve fan kanatçıklarından kaynaklı titreşimleri azaltmaktadır [6].

Bu sebeple fan kanatçıklarının üretiminde malzeme seçimi de büyük önem taşımaktadır.

Sabit kanatlı hava araçlarında titreşimi kontrol etmek ve en az seviyeye indirmek hem insan sağlığı hem de uçak ve motor performansı açısından büyük bir gerekliliktir. Titreşimin ana sebeplerinden birisinin motorlar olduğu çalışmalarda ortaya konmuştur [7].

Tüm motor takım işlemleri tamamlandıktan sonra sistemlerin iki temel fonksiyonu sağlaması beklenmektedir. Bunlar;

- Sistem davranışının ve devinimin sınırlandırılması
- Titreşimin izolasyonu ve sesin azaltılması

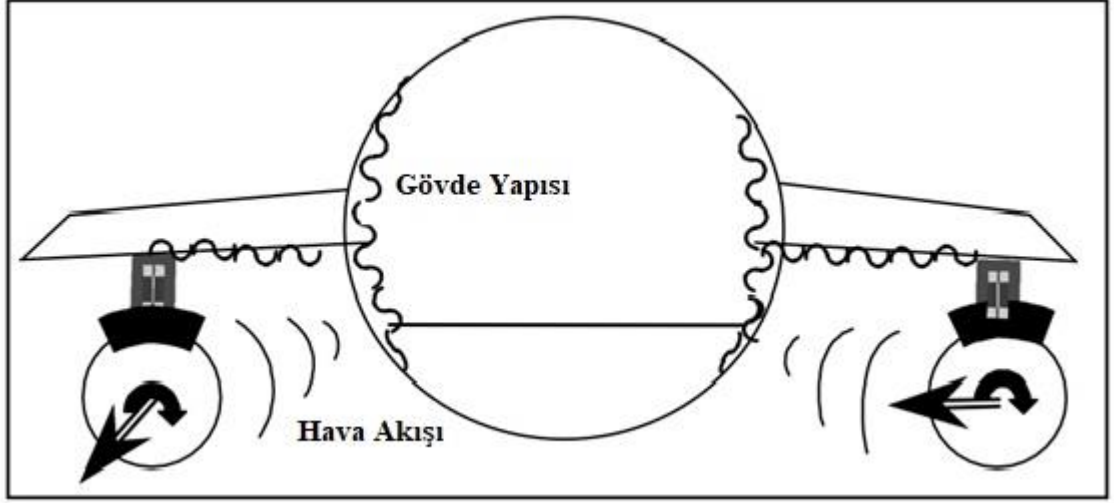


Şekil 1.1. CF6 Titanyum ve Genx kompozit fan kanatçığı

Sistem devinimi sınırlandırılması; itme kuvveti, çekme kuvveti, tork, ağırlık gibi nedenlerden dolayı meydana gelen iki sistem arasındaki hareketinin sınırlandırılması anlamına gelmektedir. Titreşim izolasyonu ve sesin azaltılması ise motorlarda meydana gelen titreşimin uçağa aktarılmasını engellemek ve kabine giden sesin azaltılmasını hedeflemektedir.

Birinci temel fonksiyonun sağlanabilmesi için montaj yapı elemanlarının birbirlerinin göre hareketlerinin en aza indirebilmek için sert ve sıkı geçmesi gerekmektedir. Birbirleri arasındaki boşluk optimum seviyede yok denecek kadar az olmalıdır. Montaj işlemleri dengeli ve hizalı bir şekilde yapılmalıdır. Motor parçalarının tasarımındaki bu sorunu azaltmak ve daha az vibrasyona sebep olacak şekilde yapıların tasarlanması yeni teknolojilerin gelişmesine neden olmuştur [8].

Bir uçak motorunun dönen parçalarında meydana gelen bir dengesizlik, yapıya uygulanan bir kuvvet oluşturacaktır. Oluşan bu kuvvetler gövdeye vibrasyon olarak iletilmektedir [7].



Şekil 1.2. Motorlarda meydana gelen vibrasyonun gövdeye iletilmesi

Meydana gelen vibrasyonun kabine iletilebileceği birkaç nokta mevcuttur. Bu noktalar motorun yapıya olan bağlantı noktaları ve titreşim emicilerdir [7].

Motor titreşimleriyle ilgili frekanslardaki gürültü genellikle harici hava akışı veya sistemlerin ürettiği gürültüden çok daha yüksek seviyelerde üretilir. Bu gürültüler genellikle geniş bant gürültü seviyelerini oluştururken, motor dönme dengesizliği temel frekanslarının ve harmoniklerinin belirli tonlarını oluşturur. Yapılan çalışmalarda motorun yapıdaki titreşiminden kaynaklanan yüksek gürültü, motor bağlantı sistemindeki yalıtkanlara duyulan en muhtemel ihtiyacı ortaya koymaktadır [7].

Motorun kanada bağlantılı olduğu günümüz modern yolcu uçaklarında vibrasyon ve gürültünün gövdeye iletiildiği nokta motorun kanada olan arka bağlantı noktası olduğu belirlenmiştir. Bu arka bağlantı tipik olarak çok sert ve kanat kirişine en yakın olan yapıya bağlanmaktadır. Kanadın bu sert birincil yapısı titreşimin gövdeye iletilmesindeki birinci yol görevi görmektedir. Ağırlık, maliyet ve kabul edilebilir titreşim/gürültü seviyelerinin tümü, yeni bir uçağın geliştirilmesi sırasında dikkate alınan temel hususlardır. Bir motor bağlantı sisteminin tasarımı bunları içermelidir [7].

Bir motor izolasyon/bağlantı sisteminin tasarımına yönelik tercih edilen yaklaşım, yapı/izolatör sağlayıcısı, hava aracı orijinal parça üreticisi (Original Equipment Manufacturer,OEM) motor üreticisi ve motor kaportası sağlayıcısı arasında sürekli fikir ve bilgi alışverişini gerektirir [7].

Vibrasyon ve gürültü azaltma sistemleri temelde iki başlık altında incelenebilmektedir. Bunlar aktif ve pasif azaltma olarak ikiye ayrılmaktadır. Aktif azaltma yöntemleri de kendi içerisinde üçe ayrılmaktadır. Bunlar;

- Aktif yalıtım kontrolü
- Aktif gürültü kontrolü
- Aktif yapı kontörlü

Ek olarak, bu çeşitli teknolojiler, çok etkili bir hibrit sistem oluşturmak için çeşitli şekillerde birleştirilebilir [8].

Pasif azaltma yöntemleri ise elastik malzemeleri, kompozit bağlantı elemanları, ayarlanabilir titreşim sönümleyicilerinden oluşmaktadır [7].

Vibrasyon ve ses azaltma uygulamaları, uygulanma yöntemlerine bağlı olarak üç kategoride incelenmiştir [7].

Vibrasyon sönümleyiciler doğrudan vibrasyon iletim yoluna yerleştirilen sistemlerdir.

- Yapı kontrol sistemleri, ana yapının asıl bir parçası olmayan, sonradan yapıya ilave edilmiş malzemeleri oluşturan sistemdir.
- Vibrasyon ve gürültüyü doğrudan meydana geldiği noktada sönümleyemeyen, yolcu kabineye yakın noktada bulunan ve bu bölgede sönümleyen sistemlerdir [7].

Vibrasyon sönümleyiciler motor ve bağlantı noktasındaki bağlantı elemanları, elastik malzemeler, hibrit malzemeler olarak incelenmiştir. Ayrıca vibrasyon sönümleyiciler yapı olarak da incelenmiş olup önceden ayarlanmış vibrasyon sönümleyiciler çalışmaların temel yapısını oluşturmaktadır [7].

Vibrasyon emiciler hakkında yapılan çalışmalar, hangi yöntemlerin daha etkili ve maliyetleri konusunda bizlere bilgi vermektedir. Uçak motorunun takım ve sönümleme işlemleri, motoru uçağa sabitlemenin yanı sıra yapıda meydana gelen kuvvetleri azaltacak böylece oluşan vibrasyonun ve sesin kabine iletilmesini azaltacaktır. Motorda meydana gelen vibrasyonun giderilmesinde hangi yaklaşımın kullanılacağı önemlidir. Tercih edilen bu yaklaşım sayesinde montaj noktasındaki kuvvetler ile kabindeki gürültü arasındaki veri iletişimi kurulabilir. Bu iletişimin işe yaraması için, motor tarafından üretilen kuvvete

ilişkin veriler, uçak gövdesi yapı özelliklerine (sertlik) ilişkin veriler ve optimum motor bölmesi düzenine ilişkin veriler paylaşılmalıdır [7].

1.2. Tezin Amacı

Uçak motorları, her bir parçası farklı özellik, performans ve güvenlik özelliklerini içeren birçok parçanın birbiriyle uyum içerisinde çalışmasını gerektiren yüksek mühendislik tasarımlarıdır. Bu motorların çalışma ömürleri boyunca, kalkıştan inişe kadar bütün uçuş fazlarında en iyi performansı vermesi beklenmektedir. Bu performansı sağlayabilmeleri için motorlar belirli uçuş saatlerini tamamladıktan sonra bakıma girmektedirler. Motorlara uygulanan bakımların asıl amacı uçuş güvenliğini arttırmak ve motorun çalışma ömürlerini daha uzun tutmaktır. Bunun yanı sıra havacılıkta bulunan rekabet ortamı gereği operatörler ve bakım kuruluşları bakımın mümkün olan en kısa sürede tamamlanıp motorların en kısa sürede servise verilmesini istemektedirler. Bunun gereği olarak bakımın hem kısa hem de en iyi şekilde tamamlanması beklenir.

Uçak motorlarının bakımlarında öncelikleri olarak ikmal ve kontrol kartları uygulanmaktadır. Bu kartların uygulandığı en önemli motor parçalarından birisi de fan kanatçıklarıdır. Fan kanatçıkları büyük miktarda havanın emilerek itkinin oluşmasına öncülük eden en önemli komponentten birisidir. Bu yüzden bakım kontrolleri çok büyük önem arz etmektedir.

Uçak motorlarında meydana gelen vibrasyonun en önemli nedeni dönen parçaların denge uyumunun bozulmasıdır. Üretimde her biri belirli ağırlığa sahip olan fan kanatçıkları bilgisayar programları tarafından fan disk üzerine merkezlenip sıralanır. Zamanla motorun uçuş ömrü boyunca maruz kaldığı dış etkenler sebebiyle bu denge uyumu bozularak motorda vibrasyona sebep olmaktadır. Bu denge bozulmasına motora giren yabancı bir madde ya da sıklıkla karşılaşılan kuş çarpmaları neden olabilmektedir. Ayrıca fan kanatçıklarının yetersiz yağlanması ya da yağın zaman içerisinde özelliğini de yitirmesi de vibrasyona sebep olmaktadır. Planlı ve plansız bakımlarda fan kanatçıklarının kontrolü ve ikmal işlemleri yapılarak motorların vibrasyon değerleri optimum seviyelerde tutulması hedeflenmektedir. Bütün yapılan bu bakım işlemleri uçağın üreticisi tarafından yayımlanan uçak bakım dokümanı (AMM)'e göre yapılmaktadır.

Fan kanatçıkları yapılan bu bakımlarda öncelikle sökülerek detaylı kontrollere tabi tutulmaktadır. Bu kontroller sırasında bulunan hasarlar üretici firmanın yayımlamış olduğu dokümanda belirtilen limitlere göre değerlendirilir. Motora giren yabancı maddeler fan kanatçıklarında hasarlara neden olabilmektedir. Bu hasarlar da motorda zaman içerisinde vibrasyona sebep olabilmektedir. Limit dışı çıkan fan kanatçıkları yenisi ile değiştirilirken limit içi çıkan fan kanatçığındaki hasarlar uçağın yapısal hasar formuna işlendikten sonra yeniden takılabilir. Sökülen fan kanatçıkları yeniden yerine takılmadan önce bakım dokümanının vermiş olduğu gereklilik gereği yağlanması gerekir. Yağlama işleminden sonra ise takılan fan kanatçıkları yüksek devirlerde motor çalıştırma işlemlerine tabi tutularak vibrasyon değerleri kontrol edilir. Uçak bilgisayar sistemlerinden alınan vibrasyon değerleri bakım dokümanlarında belirtilen limitlerle kıyaslanmaktadır. Eğer değerler yüksek veya limit dışı çıktıklarında gerekli düzeltici işlemlerin yapılması gerekmektedir.

Uçak motorlarında vibrasyon değerlerinin istenilen seviyelere indirilmesi için çeşitli yöntemler vardır. Bu çalışmada uçak üzerinde takılı bir CF6 tipi motorda vibrasyonu azaltmak adına iki farklı yöntem kullanıldı. Daha sonra elde edilen sonuçlar birbirleriyle kıyaslanarak uygulanan yöntemlerin vibrasyonu düşürmede ne derece etkili olacağı tespit edilmiştir.

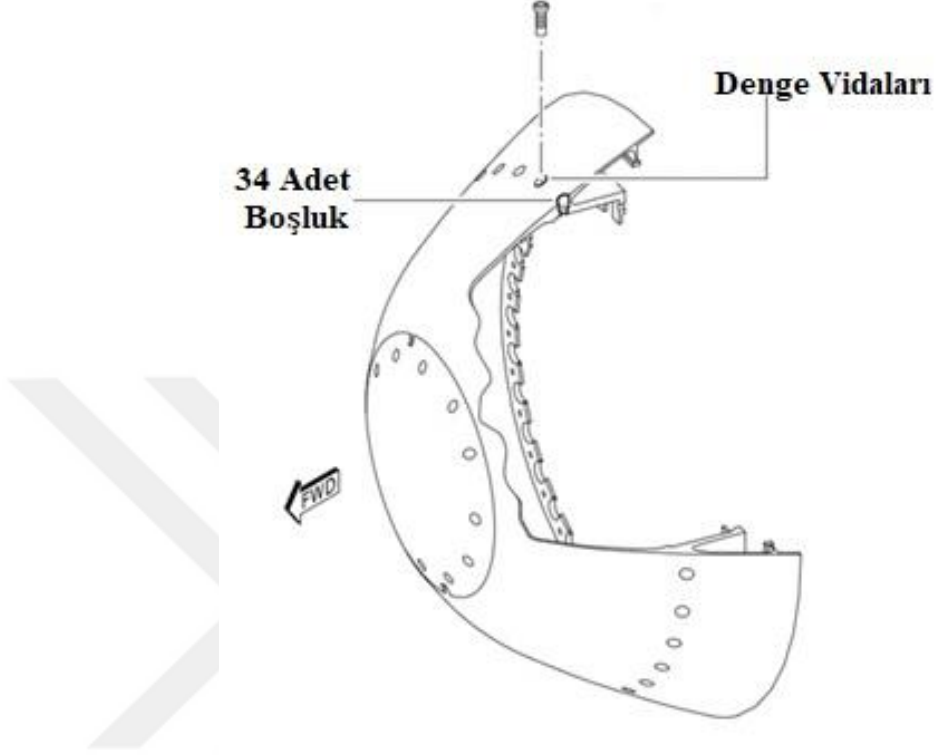
Çalışmada kullanılan bu yöntemler;

- Fan kanatçıklarının yağlanması
- Fan denge ağırlık vidalarının kullanılması

Fan kanatçıklarının yağlanması işlemi CF6 motorlarının fan kanatçıkları köklerine ve orta açıklık bölgesine uçak bakım dokümanında verilen kimyasal yağın yüzeye uygulanması işlemidir. Bu prosedürün amacı N1 titreşim aşımalarını takiben bu değerleri düşürmek ve motorun servise devam etmesini amaçlamaktadır. Düzenli ve periyodik fan kanatçıklarının yağlanması işlemi, fan kanatçık dengesini tatmin edici seviyelere indirgeyerek N1 şaftının titreşimini azaltacak, fan kanatçıklarının kaplamasının aşınması ömrünü uzatacak ve fan kanatçıklarının kullanım ömrünü uzatacaktır.

CF6 motorlarda vibrasyon değerlerini en aza indirmek için kullanılan yöntemlerden birisi de fan denge vidalarının kullanım işlemidir. Bu işlemde önceden ağırlıkları belirlenmiş

olan vidalar fan kanatçıklarının önüne gelen konik yapıdaki spinner cone denilen yapının üzerine takılır.



Şekil 1.3. Denge vidalarının konumu

Bu takım işleminde ağırlıkları önceden belirlenmiş denge vidalarının hangi fan kanatçığı üzerine denk gelen spinner cone üzerindeki boşluğa takılacağı motor ara yüzü titreşim görüntüleme ünitesi aracılığıyla hesaplanıp kokpite çok amaçlı kontrol ekranı (MCDU)'da gösterilir.



Şekil 1.4. MCDU ekranında gösterim

Denge vidalarının kullanılmasıyla vibrasyonu meydana getiren fan kanatçıklarının uyumsuzluğu giderilerek vibrasyon sönümlenmektedir. Bu yöntem kolay ve maliyeti düşük olmasının yanında hem hızlı hem de daha güvenilir sonuçlar vermektedir.

Bu çalışmamızın amacını şu şekilde belirtebiliriz;

- Fan kanatçıklarının yağlanması ile vibrasyon değerlerini düşürmek
- Fan denge ağırlık vidalarının kullanılarak vibrasyonu düşürmek
- Her iki yöntemde kullanılarak elde edilen verilerin uçak bilgisayar sisteminden alınan vibrasyon değerleriyle kıyaslanarak hangi yöntemin daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmek

1.3. Hipotez

CF6 motorlarının fan kanatçıkları her bir söküm ve takım işleminden sonra yüksek motor devirlerinde vibrasyon testlerine tabi tutulmaktadır. Bu testler motorun belirli N1 değerlerine kademe kademe ulaşarak uçak bilgisayar sisteminden alınan vibrasyon değerlerinin limitlerde olup olmadığının kontrolünü gerektirir. Aksi halde yüksek

vibrasyon değerleri hem yolcu ve uçuş ekibi açısından hem de uçak ve motor açısından tehlikeli bir durumdur.

CF6 motorlarının vibrasyon değerlini düşürmek için kullanılan çeşitli yöntemler vardır. Uçak üzerinde kullanılan yöntemlerin başında fan kanatçıklarının yağlanması ve denge ağırlık vidalarının kullanılması gelmektedir.

Vibrasyon değerlinin limit içinde tutulması motor servis ömrünü uzatmakla beraber motorun performansını da arttırmaktadır. Bu vibrasyon değerleri üretici bakım dokümanında verilmekle beraber operatör firma tarafından daha kısıtlayıcı olabilmektedir.

Vibrasyon değerleri fan kanatçıklarının yağlanması ile beraber belirli limitlere düşebilmektedir. Ancak bazen yağlama işlemi ile de istenilen değerler elde edilememektedir. Bunun yanı sıra yağlama işlemi hem zaman gerektiren hem de adam/saat yönünden bakım maliyetini arttıran bir yöntemdir.

Fan kanatçıklarına balans vidalarının takılması yapılan bu çalışmada istenilen vibrasyon değerlerine ulaşmada daha etkili bir yöntem olabilmektedir. Spinner cone üzerine takılan bu ağırlıklar uçak bilgisayarından alınan verilerle karşılaştırılmış olup vibrasyonu en az düzeye indiren etkili bir yöntem olabilmektedir.

2. BÖLÜM

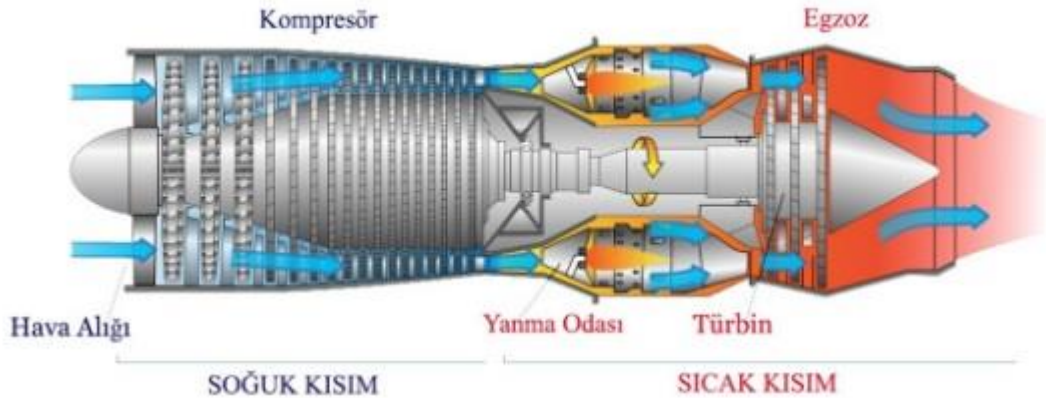
CF6 MOTORLARININ VE FAN KANATÇIKLARININ GENEL YAPISI

Bu bölümde CF6 motorları hakkında genel bilgiler verilerek, CF6 motorlarının genel yapısı, bu motorların fan kanatçıklarının yapısı ve olası vibrasyon sebepleri açıklanmıştır.

2.1. CF6 Motorlarının Genel Yapısı

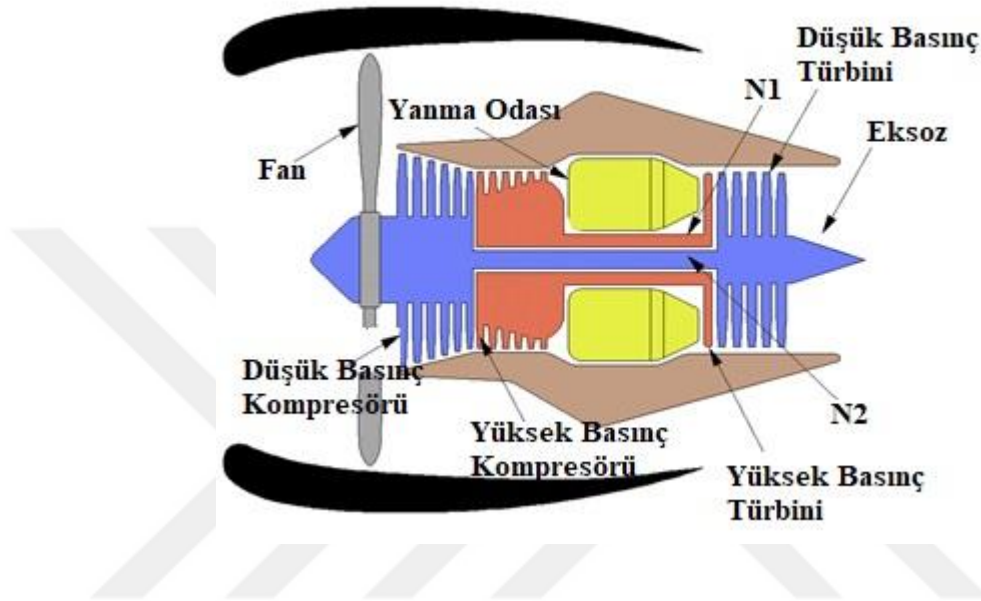
CF6 motorları ilk olarak 1971 yılında geniş gövdeli uçaklarda ticari güç ünitesi olarak hizmete girmiştir. CF6 motorları havacılıkta en uzun süredir devam eden jet motorları programıdır. Günümüzde CF6-80C2 ile üretimlerine devam etmektedir [8].

Ge CF6 motorları yüksek bypass oranına sahip (5.1:1), çift şaftlı, aksel akışlı bir turbo fan motordur. 14 kademeli yüksek basınç kompresörü, iki kademeli yüksek basınç türbini tarafından hareket ettirilir. Fan ve dört kademeli düşük basınç kompresörü ise beş kademeli düşük basınç türbini tarafından döndürülür [9].



Şekil 2.1. CF6 motor modülleri

CF6 motorları N1 alçak basınç ve N2 yüksek basınç olmak üzere iki şafta sahiptir. N1 şaftı itki kuvveti için gerekli olan havayı motorun içine çekerken N2 şaftı ise yanma miktarını ayarlayarak N1 şaftının hızını ve itki kuvvetini ayarlar [10].



Şekil 2.2. N1 ve N2 şaftları

Fan ve düşük basınç kompresörü; motorun önünde bulunan bu kısım havanın motorun içine çekilmesini sağlamaktadır. Motora çekilen havanın çok az bir miktarı motorun içine (core section) girerken büyük bir kısmı motorun dışından (bypass section) atılıp, daha sonra bu iki hava birbiriyle birleşerek itki gücünü oluşturmaktadır.

Yüksek basınç kompresörü; düşük basınç kompresöründen gelen hava burada hızı düşürülerek basınç ve sıcaklığı artırılıp yanmaya hazır hale getirilir.

Yanma odası; kompresörden gelen hava yakıt ile birleştirilerek ve gerektiğinde bujiler aracılığıyla yanma olayı burada gerçekleştirilir.

Yüksek basınç türbini; yanma odasından çıkan gazlar hızlı bir şekilde yüksek basınç türbinin kanatçıklarına çarparak N2 şaftını dolayısıyla yüksek basınç kompresörünü döndürür. Bu kanatçıklara çarpan hava hızı bir miktar azaltılarak düşük basınç türbinine yönlendirilir.

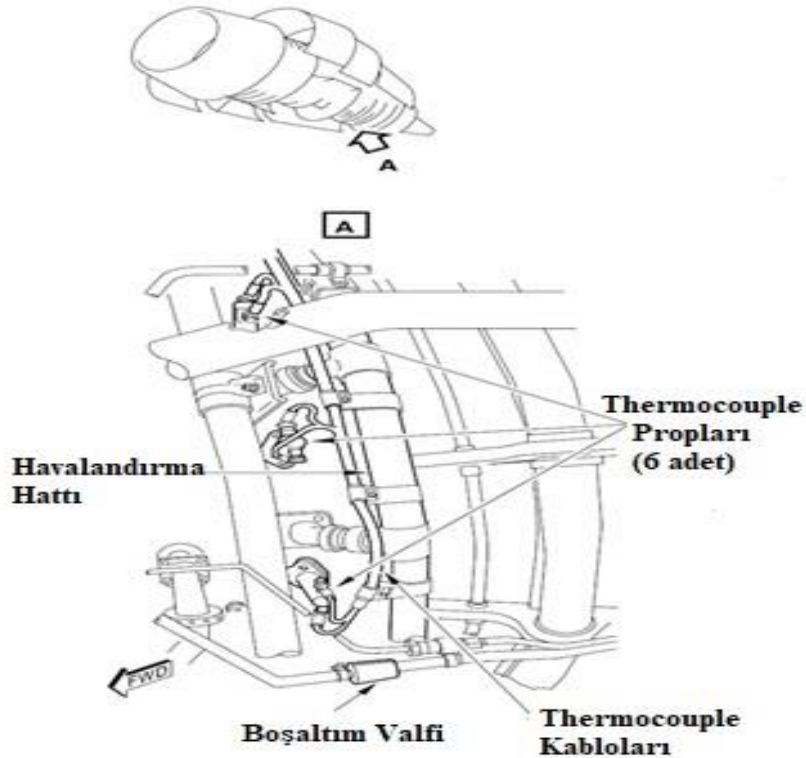
Düşük basınç türbini; Yüksek basınç türbininden geçen hava düşük basınç türbinin kanatçıklarına çarparak N1 şaftını döndürür. Motorun itki gücünün büyük bir çoğunluğu buradan çıkan hava ve bypass section'dan gelen havanın birleşmesiyle oluşmaktadır.

2.2. CF6 Motorlarının Çalışma Limitleri

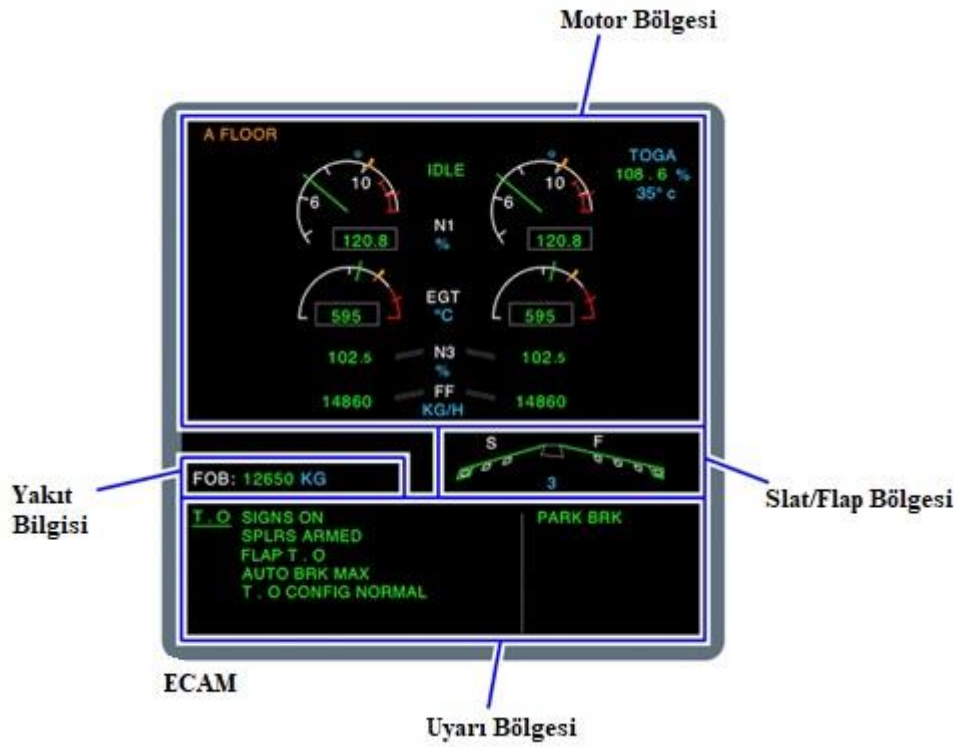
CF6-80E1 motorlarının çalışma limitleri, ilgili motorun tip sertifikasında ve bakım dokümanlarında şu şekilde belirtilmiştir;

2.2.1. Eksoz Gaz Sıcaklığı

Eksoz gaz sıcaklığı (Exhaust Gas Temperature,EGT) bazen de türbin çıkış sıcaklığı (Türbine Outlet Temperature,TOT) olarak adlandırılan sıcaklık motordaki en önemli parametrelerden birisidir. Bu sıcaklık değeri; türbinden çıkan yanmış gazların sıcaklığını ifade eder. Eksoz dış yüzeyi etrafına montelenmiş belirli sayıda thermocouple probel'lar tarafından ölçülür ve kokpit ekibine motor uyarı ekranı (Engine Warning Display,EWD) gösterge panelinde Celcius cinsinden gösterilir [11].



Şekil 2.3. EGT probes

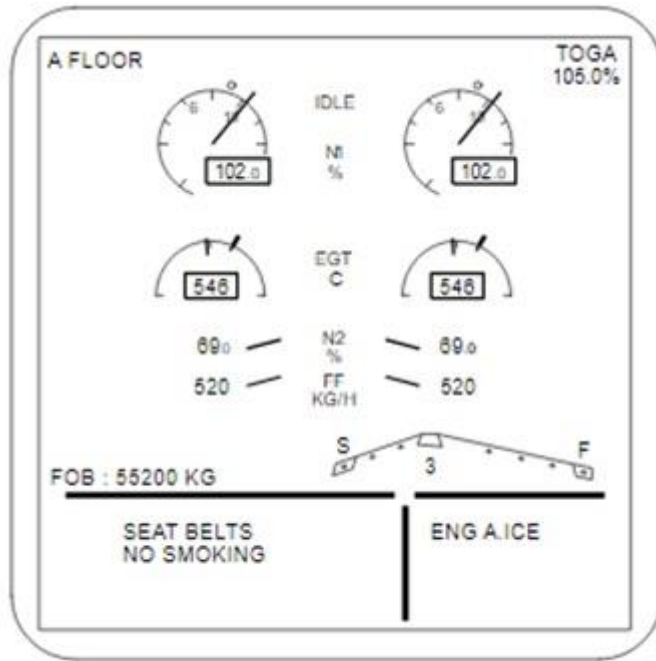


Şekil 2.4. Motor uyarı göstergesi

Motorların ilk çalışması esnasında eksoz gaz sıcaklığı limiti 750 °C'dir. Eğer motorun ilk çalıştırma sıcaklığı 750 °C ile 870 °C arasına ulaşırsa çalıştırma işlemi devam ettirilebilir ancak sıcaklık değeri uçak bakım defterine kayıt edilerek motorda bakım ve kontrol işlemleri gerçekleştirilmelidir. 870 °C üzerinde ise motorun sökülüp atölyede revizyon edilmesi gerekmektedir [11].

2.2.2. Dakikadaki Devir Sayısı

Dakikadaki devir sayısı (Speed Revolution Per Minutes,RPM) ; motor şaftlarının dönüş hızlarını ifade etmektedir. Şaftın dönüş hızını dakika başına sayarak gösterge panelinde kokpit ekibine yüzde olarak göstermektedir. CF6 motorlarında rotor hızları N1 ve N2 speed sensorlar tarafından ölçülmektedir.



Motor İkaz Göstergesi

Şekil 2.5. N1 ve N2 devirlerinin gösterimi

CF6 motorlarında izin verilen maksimum limitler şu şekildedir;

Fan Speed (N1): 115.5 percent

Core Speed (N2): 113.0 percent



Şekil 2.6. N1 trend ve limitleri

2.2.3. Yağ Basınç Ve Tüketim Değerleri

Motorun çalıştığını gösteren en önemli parametrelerden birisi motor yağ basıncıdır. Üreticinin belirlemiş olduğu limitler aralıklarında çalışmazsa motorda ciddi hasarlara neden olabilir.

Yağ sıcaklığının 65 °C - 160 °C aralıklarında yağ basıncı minimum idle da 20 psi ile 30 psi arasında değişirken, kalkış esnasında 30 psi ile 76 psi arası normal çalışma değerleridir. Yağ basıncı 10 psi ile 17 psi arasında düşerse motor servis dışı olur ve bakım kontrol gerekir. 10 psi altı durumlarda ise motor üretici firmaya raporlanmaktadır.

Limitler;

İlk çalıştırma sırasında yağın basıncı sıcaklığa bağlı olarak 160 °C kadar çıkmaktadır. Yağın basıncında herhangi bir artma gözlenmez ise motor durdurulmalıdır.

Idle (rölanti) sırasında minumum yağ basınç değeri 10 psi'dır. Normal basınç değeri 10 psi ile 30 psi arasında değişmektedir.

Düz uçuş ve kalkış esnasında ise yağ basınç değerleri 30 psi ile 90 psi arasında olmalıdır.

CF6 motorlarında yağ tüketimi son 10 uçuş referans alınarak yapılmaktadır. Ortalama yağ tüketim değerleri saatte 0.14 lt ile 0.19 lt arasında değişmektedir.

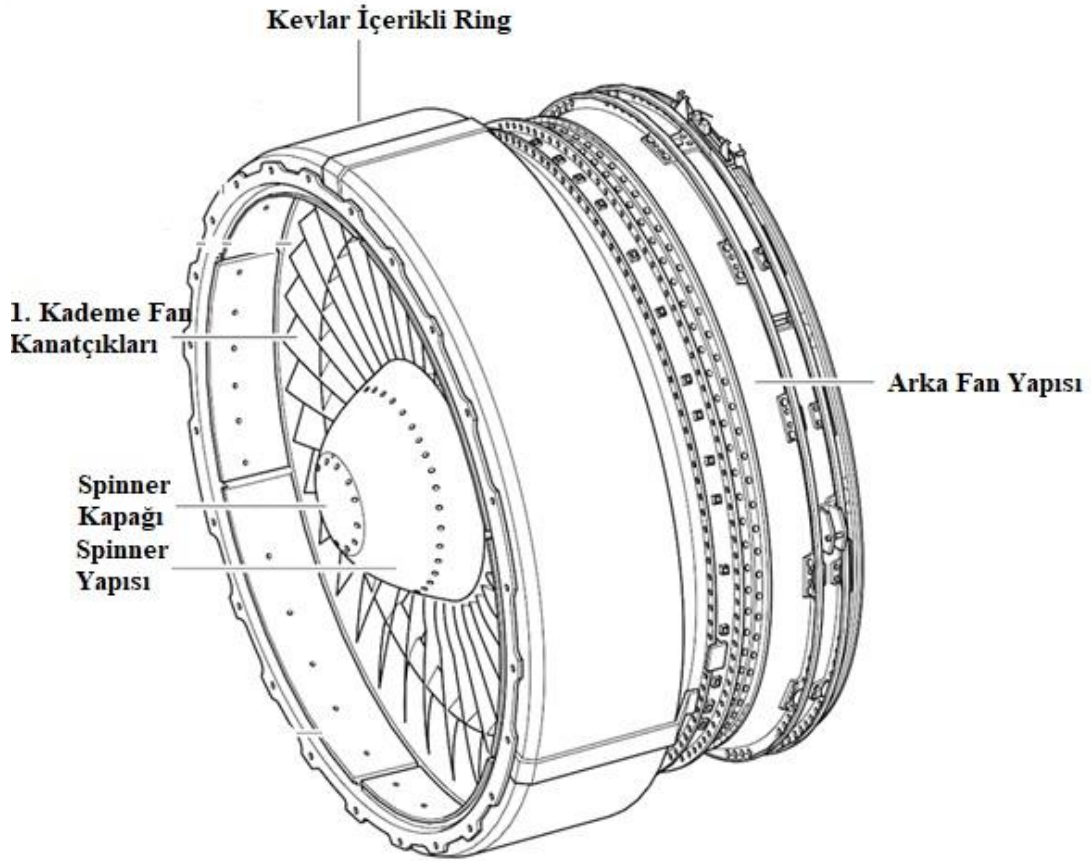


Şekil 2.7. Yağ basıncı ve miktarının ekranda gösterimi

2.3. CF6 Motorların Fan Kanatçıkları

Fan rotor; kompresör kademesindeki ilk ve en büyük rotordur. Birincil görevi büyük miktarda havayı ivmelendirip by pass havasına aktarmak, böylece ana itki gücünün oluşmasına katkı sağlamaktır. Fan N1 şaftı aracılığı ile düşük basınç türbini tarafından döndürülmektedir [12].

Fan modülü ana itki gücünün %80 ni oluşturan by pass havasının motor içine alınmasını sağlamaktadır. Fan modülü ayrıca yüksek basınç kompresörü için birincil havayı sağlamaktadır [13].



Şekil 2.8. CF6 motoru fan modülü

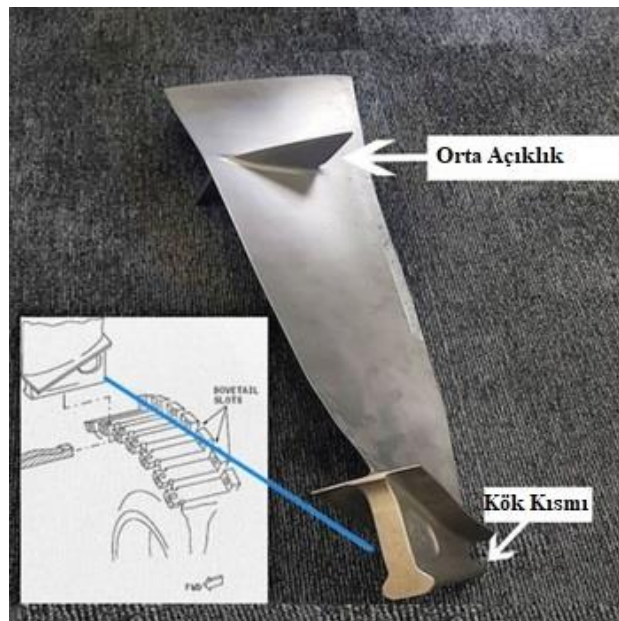
CF6 motorlarında toplamda 34 adet fan kanatçığı bulunmaktadır. Hem güç ve sağlam olması için hem de hafif olması açısından fan kanatçıkları titanyumdan üretilmiştir [14].

Motora girebilecek yabancı maddeler ilk olarak fan kanatçıklarına çarpacağından motora çok yüksek hasarlar vermemesi için fan kanatçıkları sert ve sağlam olarak dizayn edilmiştir.



Şekil 2.9. CF6 fan kanatçığı

Her bir fan kanatçığı 0,8636 m. uzunluğunda olup fan kanatçığından her iki tarafından çıkıntı oluşturan mid span shroud ile tasarlanmıştır.



Şekil 2.10. Orta açıklık yapısı

Her bir fan kanatçığı üzerindeki bu shroudlar birbirine kenetlenip kilitlenerek, burulma sertliğini arttırmakla birlikte titreşimi azaltmaktadır [14].

2.4. CF6 Motorlarında Fan Kanatçıkları Titreşim Ve Nedenleri

Motordaki titreşim, uçuş güvenliğini büyük ölçüde etkileyen önemli faktörlerden birisidir. Aşırı titreşimin neden olduğu yüksek malzeme yorgunluğu bir zaman sonra yapıda hasara neden olacak ve motorun çalışma ömrünü kısaltacaktır. Ayrıca yüksek vibrasyon uçuş ekibi ve yolcuların sağlığı üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu yüzden vibrasyon değerleri üretici firma tarafından uçuşa elverişliliğin devamı için belirli seviyelerde sınırlandırılmıştır [15].

CF6 motorlarında fan kanatçıkları (N1) vibrasyon değerleri üretici tarafından N1 % 83 devrinde maksimum 5.7 UNIT olarak belirtilmiştir. Titreşim birimleri kokpit ekibine mili inçlere dönüştürülerek sistem ekranında gösterilmektedir [16].



Şekil 2.11. Sistem Göstergesi N1 Vibrasyon Gösterimi

Düzeltilici işlem gerektiren vibrasyon değerleri aşağıda verilmektedir.

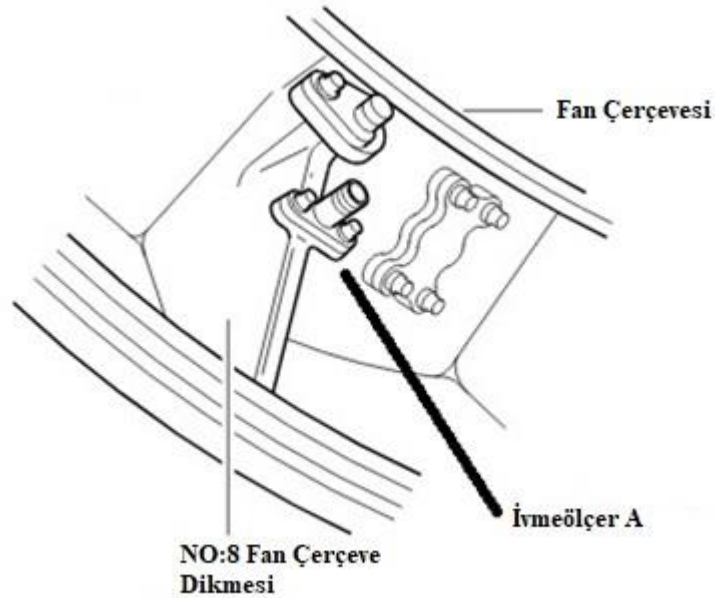
Tablo 2.1. N1 limitleri

N1 VIBRATION UNIT	DÜZELTİCİ İŞLEM
5.0 UNIT'DEN DAHA AZ	Herhangi bir işlem gerektirmez
5.0 İLE 5.7 UNIT ARASI	Düzeltilici işlem operatöre bırakılmıştır
5.7 UNIT'DEN FAZLA	Bir sonraki uçuş öncesi düzeltilici işlem gerekir

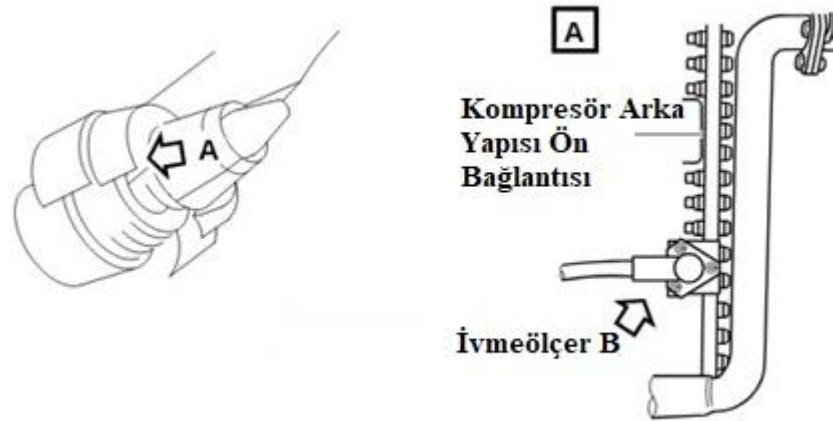
2.4.1. Vibrasyon Nedenleri

CF6 motorlarda N1 vibrasyonu fan kanatçıklarının ve düşük basınç kompresörünün titreşimi olarak tanımlanmaktadır.

N1 vibrasyonun motorun 1 numaralı yatağında bulunan ivme ölçer A (Accelerometer A) ile ölçülmektedir. Ayrıca N1 vibrasyonu motorun düşük basınç kompresörü arka yapısını konumlandırılmış olan ivme ölçer B (Accelerometer B) ile ölçülmektedir. Her iki ivme ölçerden herhangi birisi maksimum genlik değerine ulaştığında kokpit ekibine göstergeler aracılığı ile gösterilmektedir.



Şekil 2.12. İvmeölçer A



Şekil 2.13. İvmeölçer B

Motor arayüzü vibrasyon görüntüleme ünitesi N1 hızını kullanarak fan rotor dengesizliğini ölçmektedir. Daha sonra ölçülen bu değerler vibrasyon değerlerini kıyaslamak için kokpit ekibine göstergeler aracılığı ile gösterilmektedir.



Şekil 2.14. Motor Ara Yüzü Vibrasyon Görüntüleme Ünitesi

Olası vibrasyon nedenlerini şu şekilde sıralanabilmektedir;

1-Fan rotorunun dengesiz olduğu durumlarda, özellikle N1 shaftının yüksek devirlerinde vibrasyon belirgin şekilde hissedilmektedir. Fan rotorunun dengesiz olmasının birkaç nedeni bulunmaktadır.

- Fan kanatçıklarının ağırlıklarının optimum seviyede dağıtılmadan takılması, ağırlık boltlarının dengesiz atılması fan rotor dengesizliğine neden olmaktadır.

- Motora giren bir yabancı madde hasarı sebebiyle fan kanatçıklarının hasarlanması yine vibrasyona neden olabilmektedir.

-Rotor bölgesinde yabancı materyal, gevşek bırakılmış bir bağlantı, ya da sıvı bulunması da vibrasyona neden olabilmektedir.

2- Fan kanatçıklarının köklerinin ve mid span dediğimiz orta çıkıntı bölgesinin yetersiz yağlanması veya bozulmuş yağ, vibrasyona neden olmaktadır.

3- Düşük basınç türbin rotorunun dengesiz olması özellikle N1 yüksek devirlerinde vibrasyona neden olmaktadır.

4- Vibrasyon gösterge sistemlerinde ve sensörlerde meydana gelen arızalar da uçak gösterge sisteminde vibrasyon olarak görülmektedir. Elektrik kablo kontrolü yapılarak veya komponent değiştirilerek bu arıza giderilebilir [17].

3. BÖLÜM

FAN KANATÇIKLARI VE KANATÇIKLARDA MEYDANA GELEN VİBRASYON ÜZERİNE YAPILAN ULUSLARARASI ÇALIŞMALAR

Bu bölümde uçak motorlarının fan kanatçıklarından ve meydana gelen vibrasyon üzerinde yapılan çalışmalardan bahsedilerek vibrasyonun düşürülmesi için yöntemler denenmiştir.

3.1. Akustik Kara Boşluk Etkisi

Fan kanatçıklarında meydana gelen vibrasyonun en önemli nedenlerinden birisi kanatçıkların yüksek döngüsel yorulmalara neden olan akış kaynaklı titreşimlerdir. Kanatçıklarda meydana gelen bu vibrasyonların azaltılması daha düşük stres seviyelerine dolayısıyla daha uzun bir yorulma ömrü sağlayacaktır. Vibrasyon kaynaklarından birisi kanatçık profiline etki eden kaldırma kuvvetinin neden olduğu türbülansdır. Diğer nedenler arasında atmosferik türbülans ve motor bileşenlerinden kaynaklanan vibrasyonlardan bahsedilebilir [18].

Yapısal titreşimleri sönmek için kullanılan yaygın iki yöntem bulunmaktadır. Bunlardan ilki fan kanatçıkları yüzeyine yayılan dalgaların enerji dağılımını arttırmak için yüksek emici malzeme katmanlarının eklenmesine dayanır. Diğer bir yöntem ise yapısal dalgalanmaların fan kanatçıkları kenarlarından azaltılması ile vibrasyonun bastırılmasını sağlamaktadır [18].

Bowyer ve Krylov yapmış oldukları çalışmada akustik kara boşluk etkisi ile adlandırılan titreşim sönmek yöntemi üzerine çalışmışlardır [18].

Deneyler alüminyumdan yapılmış dört model kanat üzerinde gerçekleştirilmiştir. Daha gerçekçi bir fan kanadının düşünülebilmesi için bunlardan ikisi bükülmüştür. Tüm model

kanatçıklar, konik arka kenarlı olanlar ve geleneksel formda olanlar, bir elektromanyetik çalkalayıcı ile uyarılmış ve ilgili frekans tepki fonksiyonları ölçülmüştür [18].

Sonuçlar kanatçıkların firar kenarına bir bant çekilmesi sonucunda frekans tepe noktalarının önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. Bu yöntemin aerodinamik etkilerini incelemek için çalışma, kapalı devre rüzgâr tüneline yapılan ölçümler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Özellikle, fan kanatçığı profilinin firar kenarının hava akışıyla uyarılan titreşimleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır [18].

Uygun sönümleme katmanlarına sahip fan kanatçığı profilinin firar kenarlarının, fan kanatlarının hava akışından kaynaklanan titreşimlerini azaltmada etkili olduğu gösterilmiştir [18].

Fan kanatçıklarının geometrisi ile ilgili sorunların üzerinden gelmeye yardımcı olan küçük emici parçaların fan kanatçıkları firar kenarına eklenmesiyle akustik kara delik etkisi adı verilen bir etki oluşturulur. Bowyer ve Krylov yapmış oldukları bu çalışmada bu titreşim kara delik etkisinin titreşimi sönümlemede teorik olarak etkili olduğunu tespit etmişlerdir [18].

Fan kanatçığı profilinin firar kenarlarına eklenen bağlı emici katmanların küçük parçaları ile, gelen eğilme dalgası enerjisinin büyük bir kısmını emebilen eğilme dalgaları için tek boyutlu akustik kara delikler oluşturulur. Ayrıca bu yöntemin motorların fan kanatçıklarında mevcut olan aerodinamik yapısının değiştirilerek yeni tasarımların oluşmasında da yardımcı olacaktır [18].

Bowyer ve Krylov bu çalışmada turbo fan motorunun fan kanatlarının firar kenarlarının güç kanunu profiline göre modifiye edilmesinin ve eğilme dalgaları için tek boyutlu akustik kara delikler oluşturan ince sönümleyici katman şeritlerinin eklenmesinin, kanatlardaki eğilme titreşimlerini sönümlemenin etkili bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir [18].

3.2. Fan Kanatçığı Dizayn ve Yapısal Analizi Üzerine Yapılan Çalışma

Amoo, çalışmasında ticari jet motoru fan kanatlarının tasarımı ve yapısal analizindeki ilerlemeler üzerinde çalışmıştır. Fan kanatlarının gelişmiş gaz türbinli jet motorlarının performansında oynadığı kilit rol vurgulanmıştır. Son gelişmeler ve ilerlemeler, fan

kanatlarının yapısal dayanıklılığı, kararlılığı ve güvenilirliğinde artış ve iyileşmeye yol açmıştır. Bu çalışmada yeni ve yenilikçi fan kanadı teknolojilerinin geliştirilmesinde daha fazla araştırmaya yardımcı olmak için fan kanadı ortamının ve mevcut yapısal tasarım durumunun üst düzey bir incelemesi yapılmıştır [19].

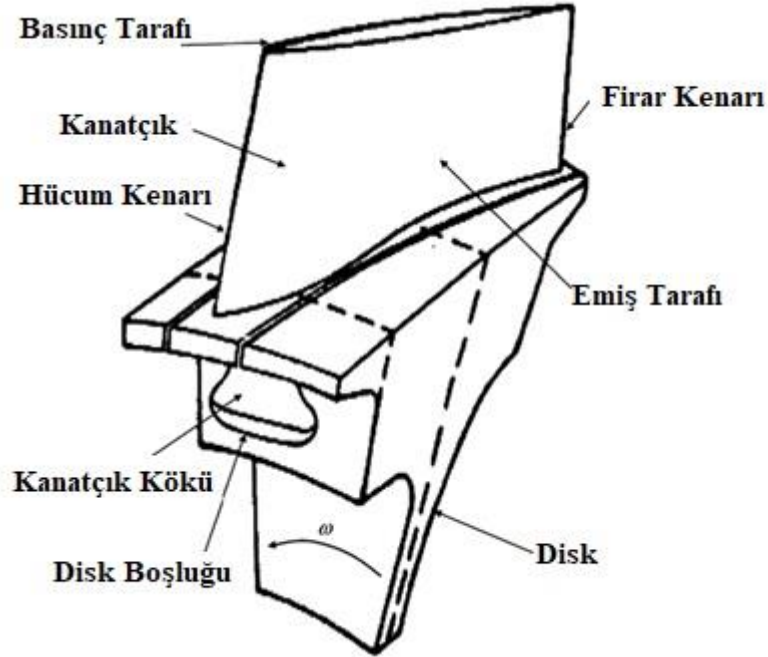
Fan kanatçıkları yıllar içinde kanatçık elemanı momentum (Blade Element Momentum ,BEM) ilkelerine dayalı olarak olgunlaşmışlardır. BEM teorisi esasen tek boyutlu (1-D) basitleştirilmiş bir teoridir ve performansın oldukça doğru bir şekilde tahmin edilmesini sağladığı için fan kanadı tasarımcıları tarafından rutin olarak kullanılmaktadır [19].

BEM teori iki farklı yaklaşımdan oluşmaktadır: bir yaklaşım kanatçık üzerinde etkili olan aerodinamik kuvvetleri dikkate alırken, diğeri momentumdaki değişiklikleri hesaba katmaktadır [19].

BEM teorisi, bir kanadın performansına ilişkin bir başlangıç noktası sağlayarak, tasarımcının optimum itme dağılımı için uygun kanat kesitini, bükümü ve hatve açısını seçmesine olanak tanır. Ancak teori, daha detaylı bir tasarım için yeterli bilgi vermez. Ayrıntılı bir tasarım, bir kanat üzerine etki eden kuvvetlerin analizi yoluyla elde edilir [19].

Fan kanatları genellikle motorun kompresör bölümünün veya "soğuk bölümünün" bir parçası olarak kabul edilir. Fan kanatları çoğunlukla titanyumdan yapılır ve bir kanat gövdesi, yuvarlak bir hücum kenarı (LE), keskin bir firar kenarı (TE), entegre bir platform tek dış bağlantısından oluşur. Titanyum olmayan kanatlar için daha iyi denge ve daha az bakım sağlayan başka tasarım yaklaşımları da vardır [19].

Fan kanatçıklarının üretiminde kullanılan malzemeler de bir o kadar önem arz etmektedir. Bu nedenle fan kanadı, mühendislik alanında kapsamlı mühendislik uygulamaları ve veri tabanları bulunan nispeten yaygın yapısal malzemelerden oluşur. Bu tür malzemeler hasar toleransı, süneklik, yüksek çevrimli yorulma dayanımı ve akma dayanımı ile karakterize edilir. Fan kanadı yapılarında gerilmelerin yüksek olması mümkündür, bu da daha güçlü malzemelerle önlenebilir [19].



Şekil 3.1. Fan kanatçığı yapısı

Titanyum, kendine özgü metalurjik özellikleri, kolay bulunabilirliği ve imalat kolaylığı nedeniyle fan kanadı imalatı için çok yönlü bir metaldir. Titanyumun başlangıçtaki yüksek maliyeti, daha uzun çalışma ömrü ve buna bağlı olarak ekipman bakımında ve uçak arıza süresinde azalmandan kaynaklanan tasarruflarla geri kazanılabilir. Titanyum fan kanatları, metalin mekanik, korozyon ve fiziksel özelliklerinin benzersiz kombinasyonu nedeniyle geçmişten günümüze iyi bir çalışma performans göstermiştir [19].

Kompozit malzemeler, fan kanadı yapılarının ağırlığını azaltabilen yüksek mukavemet-yoğunluk oranları nedeniyle hızla benzersiz bir malzeme seçimi haline gelmektedir. Kompozit fan kanatçıkları motorun toplam ağırlığında yaklaşık 1000 lbs'ye kadar tasarruf sağlayabilmektedir. Kompozit kanatçık gövdesi, metal (örn. titanyum) hücüm, kenarı ve metal kaplama ile güçlendirilerek olağanüstü hafiflik, gelişmiş mukavemet ve hasara karşı koyma yeteneği elde edilir. Bu avantaj, daha düşük kütle için daha düşük santrifüj yükleri ve gerilmeler anlamına geldiği fan kanatları için daha da önem arz etmektedir. Kompozit malzemenin sertlik-yoğunluk oranı da çelik, alüminyum veya titanyumun üç katından fazladır [19].

Kompozit kanatların aerodinamik verimliliğinin titanyum kanatlar kadar verimli olacak şekilde iyileştirilmesi, devam eden ve gelecekteki bir araştırma alanını temsil etmektedir [19].



Şekil 3.2. Titanyum hücum kenarına sahip kompozit fan kanatçığı

Fan kanatçılarının bazı kısımlarında (örneğin hücum kenarı) yapısal bütünlüğünü iyileştirmek için farklı malzemelerin benzersiz özelliklerinden yararlanan hibrit-metalik yapılar, fan kanatlarının ve diğer uçak yapılarının imalatı için gün geçtikçe daha tercih edilebilir hale gelmektedir. Fan kanatçıklarının malzemelerinde yeni bir tasarımı temsil etmektedirler. Hibrit-metalik malzemeler günümüzde Pratt-Whitney (PW) tarafından hem ağırlık hem de yapısal faydalar sağlamak için geliştirilmektedir. Titanyum fan kanatçığının yapısal hücum kenarı (LE) sertliği ile kompozit tasarımın hafifliğini bir araya getirmektedirler. Hibrit metalik yapı, fan kanatlarını kuş çarpmalarına karşı daha toleranslı hale getirmekte ve maliyetleri azaltmaktadır [19].

Maliyet, ağırlık ve aerodinamik verimlilik, fan kanatçıklarında malzemesi seçimindeki temel zorlukları oluşturmaya devam etmektedir. Kompozit malzemelerin yüksek

mukavemeti ve sertliği, malzemeyi belirli aerodinamik y¼klere g¼re uyarlama yeteneği ile birleştiğinde, fan kanatlarında kullanımlarının artmasına neden olmuştur. Karbon ve cam elyaf kompozit malzemeler, ağırlık ve yapısal sertlik avantajları nedeniyle fan kanadı malzemelerinin geleceğini temsil edebilirler [19].

Titreşim veya titreşim y¼kleri çok sayıda etkenden kaynaklanmaktadır. Motora giren hava akışı bozulması, giriş girdabı, irtifa etkileri ve ters hava akışı (stall/surge) de fan kanatlarında ¼nemli titreşimlere yol açabilir ve motor testleri sırasında değerlendirilir. Bu sebeple fan kanatçıkları, yapısal dayanıklılıkla birlikte iyi bir aerodinamik performans için tasarlanmalıdır [19].

Kısa ve orta vadede titanyum, hibrit-metalik ve kompozit malzemeler fan kanatları için tercih edilen malzemeler olmaya devam edecektir. Geliştirilmiş malzemeler, fan kanatlarının yapısal dayanıklılığını artıracaktır. Ayrıca, giderek artan y¼k seviyelerinde daha hafif tasarımlar elde etmek için, malzeme m¼hendisleri ve bilim insanlarının gelişmiş ¼zelliklere sahip ve uygun maliyetli malzemeler geliştirmeleri zorunluluk haline gelecektir. Yeni nesil fan kanatlarının ¼st¼n aerodinamik verimlilik g¼stermesi, çevresel ve daha hafif malzemeler kullanması ve ¼st¼n yapısal performans ¼zellikleri g¼stermesi beklenmektedir [19].

Havayolu taşımacılığı g¼n¼m¼zde k¼resel ekonomi için hayati ¼nem taşımaktadır. Hava taşımacılığını daha s¼rd¼r¼lebilir, verimli ve g¼venli hale getirmek için s¼rd¼r¼len çabalar, ¼ng¼r¼lebilir gelecek için ¼nemli olacaktır. Fan kanatlarının yapısal davranışını iyi analiz etmek çok ¼nemlidir. Bu nedenle de tasarımcılar ve yapı m¼hendisleri, fan kanadı tasarımlarında g¼ven oluşturmak için sayısal analiz, teçhizat ve motor testlerinden oluşan bir kombinasyona g¼venmektedirler [19].

Fan kanadı teknolojisi ileri teknolojik d¼zeydedir ve gelecekteki gelişmelerin olumlu y¼nde ilerleyeceğinin birer g¼stergesidir. Ticari jet motorları için fan kanadı yapılarının tasarımında bug¼ne kadar ilerleme kaydedilmiştir ve halen kaydedilmektedir. Bilim, sanayi ve devlet kurumları arasındaki s¼rekli iş birliği ve dayanışma, fan kanatılarının ilerlemesi ve gelişimi için ¼nemli bir araç olmaya devam edecektir [19].

3.3. Motor Bağlantısı ve Vibrasyon Kontrolü Üzerine Yapılan Örnek Bir Çalışma

Sabit kanatlı hava araçlarında titreşimi kontrol etmek ve en az seviyeye indirmek hem insan sağlığı hem de uçak ve motor performansı açısından büyük bir gerekliliktir. Titreşim ve kabin içi gürültü seviyelerini kontrol etmek için yıllardır çalışmalar yapılmış ve sistem performansı üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. Titreşimin ana sebeplerinden birisinin motorlar olduğu bu çalışmalarda ortaya konmuştur [20].

Motor takım işlemleri tamamlandıktan sonra sistemlerin iki temel fonksiyonu sağlaması beklenmektedir. Bunlar;

- Sistem davranışının ve devinimin sınırlandırılması
- Titreşimin izolasyonu ve sesin azaltılması

Sistem devinimi sınırlandırılması; itme kuvveti, çekme kuvveti, tork, ağırlık gibi nedenlerden dolayı meydana gelen iki sistem arasındaki hareketinin sınırlandırılması anlamına gelmektedir. Titreşim izolasyonu ve sesin azaltılması ise motorlarda meydana gelen titreşimin uçağa aktarılmasını engellemek ve kabine giden sesin azaltılmasını hedeflemektedir [20].

Meydana gelen vibrasyonun kabine iletilebileceği birkaç nokta mevcuttur. Bu noktalar motorun yapıya olan bağlantı noktaları ve titreşim emicilerdir [20].

Sistem davranışının ve devinimin sınırlandırılması için montaj yapı elemanlarının birbirlerinin göre hareketlerinin azaltmak, sert ve sıkı geçmesini sağlamak gerekmektedir. Birbirleri arasındaki boşluk optimum seviyede yok denecek kadar az olmalıdır. Montaj işlemleri dengeli ve hizalı bir şekilde yapılmalıdır. Motor parçalarının tasarımındaki bu sorunu azaltmak ve daha az vibrasyona sebep olacak şekilde yapıların tasarlanması yeni teknolojilerin gelişmesine neden olmuştur [20].

Motor titreşimleriyle ilgili frekanslardaki gürültü genellikle harici hava akışı veya sistemlerin ürettiği gürültüden çok daha yüksek seviyelerde üretilir. Bu gürültüler genellikle geniş bant gürültü seviyelerini oluştururken, motor dönme dengesizliği temel frekanslarının ve harmoniklerinin belirli tonlarını oluşturur. Yapılan çalışmalarda motorun yapıdaki titreşiminden kaynaklanan yüksek gürültü, motor bağlantı sistemindeki yalıtkanlara duyulan en muhtemel ihtiyacı ortaya koymaktadır [20].

Motor-kanat bağlantılı günümüz modern yolcu uçaklarında vibrasyon ve gürültünün gövdeye iletiildiği nokta, motorun kanada olan arka bağlantı noktası olduğu belirlenmiştir. Bu arka bağlantı tipik olarak çok sert ve kanat kirişine en yakın olan yapıya bağlanmaktadır. Kanadın bu sert birincil yapısı titreşimin gövdeye iletilmesindeki birinci yol görevi görmektedir [20].

Ağırlık, maliyet ve kabul edilebilir titreşim/gürültü seviyelerinin tümü, yeni bir uçağın geliştirilmesi sırasında dikkate alınan temel hususlardır. Bir motor bağlantı sisteminin tasarımı bunları içermelidir [20].

Vibrasyon ve gürültü azaltma sistemleri temelde iki başlık altında incelenebilmektedir. Bunlar aktif ve pasif azaltma olarak ikiye ayrılmaktadır. Aktif azaltma yöntemleri de kendi içerisinde üçe ayrılmaktadır. Bunlar;

- Aktif yalıtım kontrolü
- Aktif gürültü kontrolü
- Aktif yapı kontrolü

Pasif azaltma yöntemleri ise elastik malzemeleri, kompozit bağlantı elemanları, ayarlanabilir titreşim sönümleyicilerinden oluşmaktadır [20].

Vibrasyon ve ses azaltma uygulamaları, uygulanma yöntemlerine bağlı olarak üç kategoride incelenmiştir [20].

- Vibrasyon sönümleyiciler doğrudan vibrasyon iletim yoluna yerleştirilen sistemlerdir.
- Yapı kontrol sistemleri, ana yapının asıl bir parçası olmayan, sonradan yapıya ilave edilmiş malzemeleri oluşturan sistemdir.
- Vibrasyon ve gürültüyü doğrudan meydana geldiği noktada sönümleyemeyen, yolcu kabinine yakın noktada bulunan ve bu bölgede sönümleyen sistemlerdir [20].

Vibrasyon sönümleyiciler motor ve bağlantı noktasındaki bağlantı elemanları, elastik malzemeler, hibrit malzemeler olarak incelenmiştir. Ayrıca vibrasyon sönümleyiciler yapı olarak da incelenmiş olup önceden ayarlanmış vibrasyon sönümleyiciler çalışmaların temel yapısını oluşturmaktadır [20].

Vibrasyon emiciler hakkında yapılan çalışmalar, hangi yöntemlerin daha etkili ve maliyetleri konusunda bizlere bilgi vermektedir. Uçak motorunun takım ve sönümleme işlemleri, motoru uçağa sabitlemenin yanı sıra yapıda meydana gelen kuvvetleri azaltacak böylece oluşan vibrasyonun ve sesin kabine iletilmesini azaltacaktır. Motorda meydana gelen vibrasyonun giderilmesinde hangi yaklaşımın kullanılacağı önemlidir. Tercih edilen bu yaklaşım sayesinde montaj noktasındaki kuvvetler ile kabindeki gürültü arasındaki veri iletişimi kurulabilir. Bu iletişimin işe yaraması için, motor tarafından üretilen kuvvete ilişkin veriler, uçak gövdesi yapı özelliklerine (sertlik) ilişkin veriler ve optimum motor bölmesi düzenine ilişkin veriler paylaşılmalıdır [20].

3.4. Titreşim Davranışına Odaklanarak Kompozit Kanat Tasarımı ve Testi Üzerine Yapılan Bir Çalışma

Uçakların güvenilirliğinin yanı sıra ekonomik ve ekolojik verimliliğinin artırılması, günümüzde havacılıktaki en önemli hedeflerden biridir. Dönen bileşenlerin performansına ve uçak motorlarının yanı sıra gaz türbinlerinde gürültünün azaltılmasına yönelik artan talepler, daha yüksek dinamik gereksinimlere yol açmaktadır. Kompozit malzemeler, doğaları gereği avantajlı sönümleme davranışları ve yüksek özgül sertlikleri nedeniyle titreşim genliklerinin azaltılmasına katkıda bulunabilir [21].

Kompozit malzemelerin hem rüzgâr türbinlerindeki kanatlar hem de uçak motorlarındaki fan kanatları için uygulanması, bu malzemelerin dönen bileşenler için uygun bir potansiyeli olduğunu göstermiştir [21].

Fan kanatçıklarında karbon elyaf takviyeli plastik gibi kompozitlerin kullanımı kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Mevcut çeşitli patentler ve yayınlar, kanat profili, platform ve kökün farklı tasarımlarını göstermektedir. Temel amaç, yüksek modüllü ve yüksek mukavemetli lifler kullanırken yüksek bir sertlik ve mukavemet / ağırlık oranına ulaşmaktır [21].

Bu çalışmada kompozit kompresör kanatlarının tasarımı için bir yöntem sunulmuş ve

deneysel değerlendirmeler için prototipler üretmek üzere bir üretim teknolojisi önerilmiştir [21].

İncelenen kanadın tasarımı için, temsili bir kanat profili ve monolitik bir kanadın kök geometrisi kompresör kanadı kullanılmıştır. Kompozit bir kompresör kanadının tasarımında malzeme seçimi için farklı hususların dikkate alınması gerekmiştir [25].

Kompozit kompresör kanadının tasarımını seçmek, kullanılacak kompoziti seçmek kadar önemli ve gereklidir [21].

Titreşim davranışının sayısal olarak tahmin edilmesi, özellikle öz frekans ve modal sönümlenme gibi modal parametreler elyaf yöneliminden etkilendiğinden, kompozit malzemelerin rotorlarda verimli bir şekilde kullanılması için gereklidir. Bu araştırma için, titreşim davranışına odaklanılarak kompozit bir fan kanatçığı tasarlanmıştır [21].

Yapılan bu çalışmada modal parametreler sayısal olarak tahmin edilmiş ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Kompozitlerin sönümlenmesi, gerinim enerjisi yöntemi kullanılarak dikkate alınmıştır. Bu yöntem kullanılarak, kompresör kanadının modal sönümlenme parametreleri, tek yönlü karbon fiber takviyeli epoksi katmanlarının yöne bağlı malzeme özelliklerine dayalı olarak hesaplanmıştır [21].

Bu çalışmada elde edilen deneysel ve sayısal veriler ile bir model analiz gerçekleştirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Monolitik bir referans kanadın kanat profili ve kök geometrisinden yola çıkılarak kompozit bir kompresör kanadının tasarımı açıklanmıştır. Tasarım süreci, yaklaşık 16 000 RPM dönüş hızı için temsili bir kanat üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca, seçilen kanadın üretimi, dönme testi ve prototiplerin geometrik varyasyonlarının incelenmesi kısaca gösterilmiştir [21].

Üretilen prototipler, maksimum kanat kalınlığında 0,06 mm'ye kadar farklılıklar göstermektedir. Titreşim davranışının belirlenmesi için sayısal bir model ve model kayıp faktörünün dikkate alınması için ek bir uzantı tanıtılmıştır. Tahmin edilen öz frekanslar ve modal şekilleri, bu çalışmada da sunulan deneysel model analiz sonuçlarıyla iyi bir uyum göstermektedir [21].

Yapılan bu çalışma, gelecekteki çalışmalarda sunulan kompozit kompresör kanadı ve diğer kanat konfigürasyonları, dönme koşulları altında titreşim davranışının deneysel bir değerlendirmesi için kullanılabilir. Genel sönümlenme davranışının doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için sürtünmenin etkisi de dikkate alınmalıdır. Ayrıca, yabancı cisim

hasarı durumunda da kanat davranışının incelenmesi gelecekteki çalışmaların da odak noktası olacaktır [21].

3.5. Kompozit Bir Kanadın Titreşim ve Sönümlenme Analizi Üzerine Yapılan Bir Çalışma

Fiber takviyeli polimer kompozitler , metallere kıyasla hafiflik, yüksek özgül mukavemet ve sağlamlık gibi ilginç özelliklere sahiptir. Aynı zamanda, polimer matrisin viskoelastik özelliklerinden dolayı fiber takviyeli polimer kompozitleri'nin mükemmel malzeme sönümlenme performansı, yapının dinamik performansının iyileştirilmesinde önemli bir rol oynar [22].

Sönümün belirlenmesi, kompozit yapıların sönümlü dinamik analizi için çok önemlidir. Bu çalışmada, yapılan analiz kompozit fan kanadı gibi karmaşık bir kompozit yapı için, yapısal sönümlenme ile hesaplanmış ve sönümlü dinamik hesaplama için kullanılmıştır [22].

Kompozit malzemelerin sönümlenme özellikleri frekansa bağlıdır ve kompozit kanatçıklarının frekans özelliklerini gösterir. Bu nedenle kompozit malzemelerin yüksek frekans sönümlenme özellikleri ilk olarak istatistiksel yöntem kullanılarak tahmin edilebilir [22].

Bu çalışmada, kompozit fan kanatçığının sönümlenme özellikleri dürtü/frekans yanıtı yöntemi kullanılarak ölçülmüş ve bant genişliği yöntemi ile hesaplanmıştır. Kompozit kanatçığı serbestçe bir noktaya asılır. Kanadın titreşimini tetiklemek için bir darbe çekici kullanılır. Aynı zamanda, çekiç üzerine yerleştirilen bir kuvvet dönüştürücü zamanın bir fonksiyonu olarak sinyalin elde edilmesini sağlar. Ek kütlelerin kompozit kanatçık üzerindeki etkisini azaltmak için, yapının dinamik tepkilerini tespit etmek üzere düşük kütleli (0,5 g) bir ivmeölçer kullanılmıştır. Daha sonra, koşullandırılmış güç yükseltici aracılığıyla, uyarma ve yanıt sinyalleri dijitalleştirilir ve dinamik analizör tarafından işlenmiştir [22].

Bu çalışmanın sonucunda kompozit kanadın yapısal sönümlenmesini hesaplamak için hibrit bir yöntem önerilmiştir. Yüksek frekanslı malzeme sönümlenmesi, model sönümlenme ve yapısal sönümlenme parametreleri sırayla hesaplanmıştır. Hibrit yöntemin

tahmin sonuçları, iki kompozit kanadın karşılık gelen deney değerleri ile doğrulanmıştır [22].

Bu sonuçlara göre;

- Hibrit yöntem, kompozit pervane kanadının yapısal sönümlemesini belirlemek için uygundur. Aynı zamanda, diğer karmaşık kompozit yapılar için de genelleştirilebilir.
- Sertlik orantılı sönümlenme, kompozit kanadın yapısal sönümlenme kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sertlik orantılı sönümlenme ne kadar büyük olursa, genlik o kadar küçük olur.
- Kompozit kanadın yapısal sönümlenmesi mükemmel bir tasarlanabilirlik sergilemektedir. Kompozit kanadın dinamik tepkileri, yapısal sönümlenmenin tasarımı optimize edilerek geliştirilebilir [22].

3.6. Sürtünme Kaynaklı Kompozit Fan Kanadı Titreşimlerinin ve Aşınabilir Kaplamanın Çıkarılmasının Sayısal İncelenmesi

Bu çalışmada kompozit kanat titreşimleri, aşınabilir kaplamanın çıkarılması ve kanatçık/yapı sürtünmelerinden kaynaklanan kanatçık gerilmeleri incelenmiştir. Farklı bir metal kanada sahip kompozit fan kanadı modelleri oluşturulmuş ve üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanmıştır [23].

Modern ticari yolcu uçak motorlarının verimliliği ve dayanıklılığı arasındaki dengenin korunması günümüzde giderek daha kritik hale gelmiştir. Turbo fan motorlarının genel verimliliği aerodinamik, yanma, mekanik vb. alanlardaki performansların birleşimidir. Aerodinamiğin turbo fan motorlarının genel verimlilikleri üzerindeki etkileri önemlidir ve kanat ucu açıklıklarının neden olduğu "uç sızıntı akışı" aerodinamik performansları etkileyen temel faktördür. Modern yolcu uçak motorlarındaki yüksek gereksinimler göz önüne alındığında, dönen fan kanatçıkları ile onları çevreleyen sabit gövde arasındaki boşluğun en aza indirilmesi uçak motoru tasarımında öncelikli bir alanıdır. Ancak böyle bir yön, beklenmedik kanat titreşimlerine veya hasara yol açabilecek kanat-gövde sürtünmesi olasılığını artırır. Belirli durumlarda, bu tür titreşimler fan kanatçıklarının kırılmalarına, shaft arızalarına vb. neden olabilir ve feci kazalara yol açabilir [23].

Fan kanatlarının son teknoloji tasarımında geleneksel metal kanatların yerini reçine bazlı karbon fiber kompozit kanatlar almıştır; bu yeni fan kanatları motor güvenliği, güvenilirliği, dayanıklılığı ve bakım kabiliyetinde önemli gelişmeler sergilemektedir. Kompozit fan kanatlarının mukavemet ve yorulma direnci açısından önemli avantajlarına rağmen, sürtünme kaynaklı kompozit kanat titreşimlerine ve buna bağlı olarak aşınabilir kaplamanın çıkarılmasına odaklanan çalışmalar sınırlıdır; bu araştırmalar motor güvenliği ve dayanıklılığı açısından çok önemlidir [23].

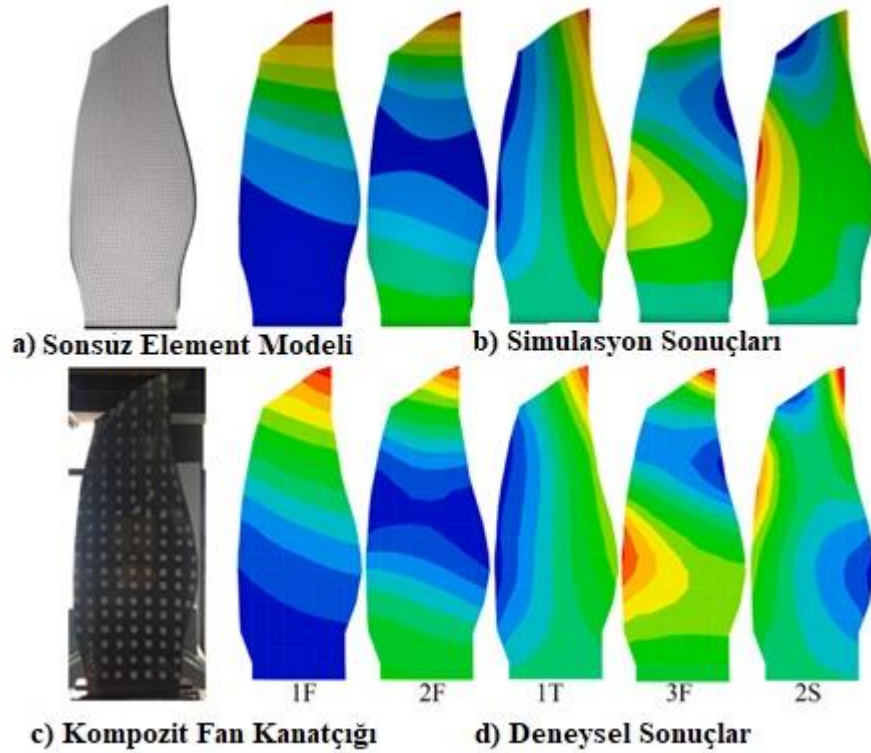
GENx'te olduğu gibi kompozit fan kanatları öncelikle metaller yerine ortotropik kompozit malzemelerden yapılır, bu da kompozit kanatların iç yapılarının geleneksel metal kanatlara göre çok daha karmaşık olmasına neden olur. Ayrıca, üst üste sıralarının farklı malzeme yapılarındaki kompozit kanatların dinamik özellikleri üzerindeki etkileri de dikkate değerdir. Sonuç olarak, kompozit kanatların sürtünme kaynaklı titreşimlerini incelemek için evrensel bir sürtünme modeli oluşturmak zordur; buna göre, bu sorunu araştırmak için, tam üç boyutlu bir sonlu elemanlar yöntemi muhtemelen en uygun yaklaşımdır [23].

Yapılan bu çalışmada, ilk olarak kompozit fan kanadı tasarımı tanıtılmakta; ardından sonlu eleman modelinin ve dinamik denklemin oluşturulması sunulmaktadır. Daha sonra, kompozit fan kanatlarının sönümünün belirlenmesi kısaca açıklanmış ve fan kanadı modelleme prosedürü, oluşturulan sayısal yöntemle birlikte özetlenmiştir. Sonuçta ise çalışma koşulları ve varsayımlar detaylandırılmıştır [23].

Bu çalışmada, dört kompozit kanat ve bir metal kanatta kanat sürtünmesi kaynaklı titreşimler, aşınabilir kaplama sökülmeleri ve kanat gerilmeleri sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Kompozit kanat yapısal tasarımını, kanat/yapı sürtünmelerinin sayısal hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplama aşınabilir kaplama, azaltılmış dereceli modelleme, merkezkaç sertliği, kompozit kanadın sönümlenmesi ve diğer iyi bilinen sayısal yöntemler kullanılmıştır [23].

Sonuç olarak, makalenin kendi bütünlüğü için, kompozit bir fan kanadının model analizi ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması yoluyla kompozit kanat modellemesinin bir doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Kompozit fan kanadının ilk beş modeli, kanadın simülasyon ve deneysel model şekilleri gösterilmektedir. Bunlar, hesaplama ve deneysel sonuçlar arasındaki ilk beş model frekanstaki maksimum farkın %4'ten az olduğunu

göstermektedir. Ayrıca, simülasyon ve deneysel sonuçlar arasındaki ilk dört kanat modelinin şekillerindeki farklılıklar (pratik olarak) ayırt edilememektedir [23].



Şekil 3.3. Simülasyon ve deneysel sonuçları

Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan kompozit fan kanadı modelleme yönteminin kanat titreşimi incelemeleri için uygun olduğu düşünülmektedir [23].

3.7. Dönen Kompozit Fan Kanatlarının Piezoelektrik Titreşim Sönümlenme Kontrolü İçin Sayısal Modelleme Yöntemi ve Deneysel Çalışma

Min ve arkadaşlarının yapmış oldukları bu çalışmadaki amaçları şu şekilde sıralanabilir:

- Motor fan kanatçıklarının zorlanmış titreşim tepki analizi için çok fizikli piezoelektrik sonlu eleman kompozit kanat modelini analiz etmek için bir yöntem geliştirmek
- Sayısal bir modeli deneysel test verileriyle değerlendirmek

Dönen piezoelektrik kompozit alt ölçekli fan kanatları için sayısal ve deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir [24].

Gelişmiş uçak motoru bileşenlerine yönelik gereksinimler, daha hafif ve verimli, ancak aşırı titreşime, karmaşık dinamik davranışa ve belirsiz dayanıklılık ve güvenilirliğe karşı daha duyarlı tasarımlara yol açmaktadır. Dinamik davranışın bu karmaşık yapısı aynı zamanda daha kalın kanat tasarımlarına, dolayısıyla daha fazla yakıt yanmasına, daha fazla gürültüye, potansiyel olarak motor ömrünün kısılmasına ve bakım maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır [24].

Yüksek verimli ve daha hafif uçak motorlarının geliştirilmesinde karşılaşılan zorluklardan biri, yüksek performanslı döner kanatların yüksek titreşim gerilmelerinin bir sonucu olarak yüksek çevrimli yorulma sınırlamalarına tabi olmasıdır. Turbo fan motorlarının kanatlarının aşırı titreşimi, yüksek çevrimli yorulma sorunlarına neden olan aşırı titreşim seviyelerini azaltmak için sönümlenme işlemleri gerektirir. Yüksek devirlerde dönen fan kanatçıklarının sönümlenme işlemleri tasarlamak, yüksek sıcaklıklar ve santrifüj ivmeleri gibi çeşitli faktörler nedeniyle zor bir iştir [24].

Piezoelektrik sönümlenme de sönümlenme işlemi için bir çözüm olarak araştırılmıştır. Piezoelektrik bir malzeme bir gerilme yaşadığında, bu enerjinin bir kısmı dielektrik enerjiye dönüşür ve malzemede depolanır. Bu anlamda piezoelektrik malzemeler elektriksel olarak bir kapasitör gibi davranır [24].

Bu çalışma, grafit-epoksi kompozit alt ölçekli fan kanadı numuneleri üzerinde yüzeye monte piezoelektrik yamalar kullanarak rezonans sönümlenme kontrolüne odaklanmıştır. Çalışmada deneysel test ve analizlerin dikkatli bir kombinasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma için hedef kanat örneği, yaklaşık 600 °F sıcaklığa kadar çalışan bir General Electric Aviation (GE) GENx motor alt ölçekli kompozit fan kanadıdır. Deneysel test, rotorun bir vakum tankı içinde aktif manyetik yatakların sağladığı uyarımla döndürülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu teçhizat, testte aerodinamik kuvvetler bulunmadığından yapısal sönümlenmenin kendi başına ölçülmesine izin verir [24].



Şekil 3.4. Piezoelektrik yamaların fan kanatçığı yüzeyine montajı

Bu çalışmada açıklanan deneysel kanat dönüş testi ve çoklu fizik sonlu eleman modelleme teknikleri, piezoelektrik sönümlenmenin kompozit fan kanatlarının titreşimlerini önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir. Ayrıca maksimum piezoelektrik titreşim kontrolü faydası için optimum yama konumunun rotor hızının bir fonksiyonu olarak değerlendirilmesi gerektiği belirlenmişti. Ayrıca bu çalışmada uçak motor kanatlarındaki titreşimleri azaltmak için piezoelektrik titreşim sönümleme tekniğini geliştirmek ve göstermek için dönme altındaki elektrik devresi beslemeli piezoelektrik yamalı kompozit fan kanatçık numuneleri kullanılarak sayısal ve deneysel bir çalışma yapılmıştır. Gerçek kompozit fan kanadı alt ölçekli numuneleri kullanılarak dönme sırasında piezoelektrik kanat sönümleme yaklaşımlarının uygulanabilirliğini değerlendirmek için hem analitik hem de deneysel bir çalışma kullanılmıştır [24].

Bu çalışmada sunulan sonuçlar, güvenli olmayan titreşim dinamik gerilimlerini azaltarak motor ömrünün uzamasının yanı sıra hasar toleransının da artmasını sağlayabilir. Ayrıca, bu teknolojinin optimize edilmiş entegre bir uygulaması, geleneksel sönümleme teknolojisi sistemlerinin kullanımına kıyasla genel uçak ağırlığı ve hacim tasarrufu sağlayabilir [24].

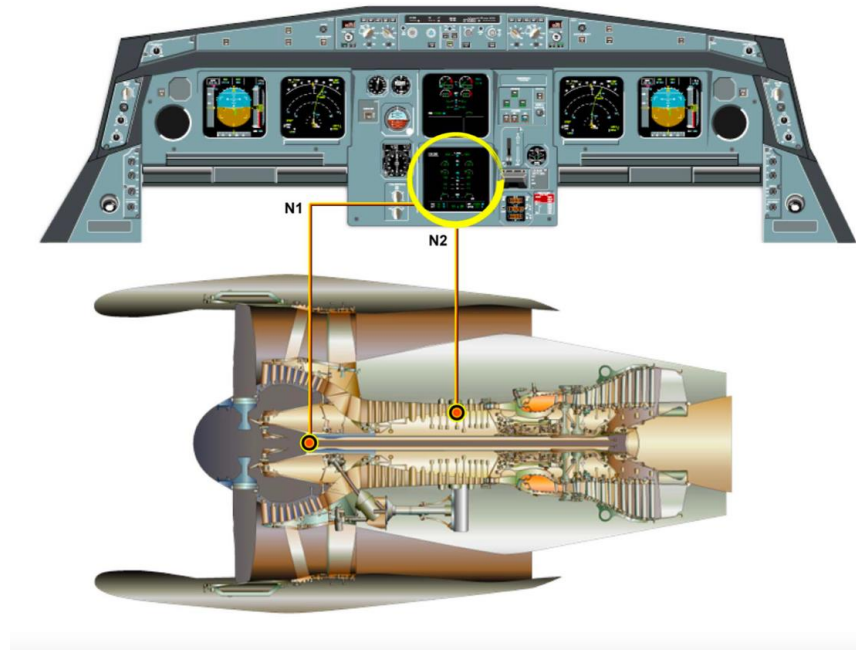
4. BÖLÜM

FAN KANATÇIKLARI TİTREŞİM TESPİTİ VE GİDERİLME YÖNTEMLERİ

Bu bölümde uçak kanadında meydana gelen vibrasyon tespiti ve bunların giderilme yöntemlerinden bahsedilmektedir.

4.1. Vibrasyon Tespit Yöntemi

GE CF6 motorlarında vibrasyon görüntüleme sistemi, N1 ve N2 rotorlarında meydana gelen titreşimi tespit eden ve bu titreşim değerlerini kokpit ekibine gösteren sistemdir. Vibrasyon görüntüleme sistemi ayrıca fan trim balans ayarı yapılmasına ve motor vibrasyon trendinin izlenmesine yardımcı olmaktadır [25].



Şekil 4.1. Vibrasyon görüntüleme sistemi

Her bir motor vibrasyon görüntüleme sistemi şunları içermektedir;

- İki görüntüleme sensörü (piezo-elektrik ivmeölçer); N1 yatak vibrasyon sensörü ve N2 kompresör arka çerçevesi (Compressor Rear Frame,CRF) vibrasyon sensörü
- İki adet takometre; N1 hız sensörü ve N2 hız sensörü
- Bir motor arayüzü ve vibrasyon izleme ünitesi
- Bir uzaktan dönüştürücü (Remote Charge Converter,RCC) [25].

4.1.1. N1 ve N2 Vibrasyon Sensörleri

N1 yatak vibrasyon sensörü ve N2 kompresör arka çerçevesi vibrasyon sensörü, monte edildikleri konumların etrafındaki titreşimleri algırlar ve uzaktan dönüştürücüye analog sinyal olarak gönderirler. RCC bu sinyalleri güçlendirerek motor ara yüzü ve vibrasyon izleme ünitesine göndermektedir. Sinyaller burada dijital çıkışa dönüştürülür ve görüntülenmek üzere kokpit gösterge ekranlarına gönderilir [25].

Fan titreşim sensörü olarak da adlandırılan N1 yatak ivmeölçeri A karterine takılmıştır. N1 yatak ivme ölçeri fan çerçevesindeki fan rotoru titreşimini izlemek için tasarlanmıştır. N2 titreşim sensörü olarak da adlandırılan CRF ivmeölçer ise kompresör arka çerçevesinin ön flanşına saat 10 pozisyonunda takılıdır ve LP türbini titreşimini izlemek için tasarlanmıştır [25].

4.1.2. N1 ve N2 Hız Sensörleri

N1 hız sensörü düşük basınç (LP) rotor hızını algırlarken N2 hız sensörü yüksek basınç (HP) rotorundaki hızı ölçmek için tasarlanmıştır. N1 hız sensörü ölçmüş olduğu değeri motor ara yüzü ve vibrasyon izleme ünitesi ile motor kontrol ünitesine (Engine Control Unit,ECU) gönderirken N2 hız sensörü ölçmüş olduğu değerleri motor kontrol ünitesine göndermektedir [25].

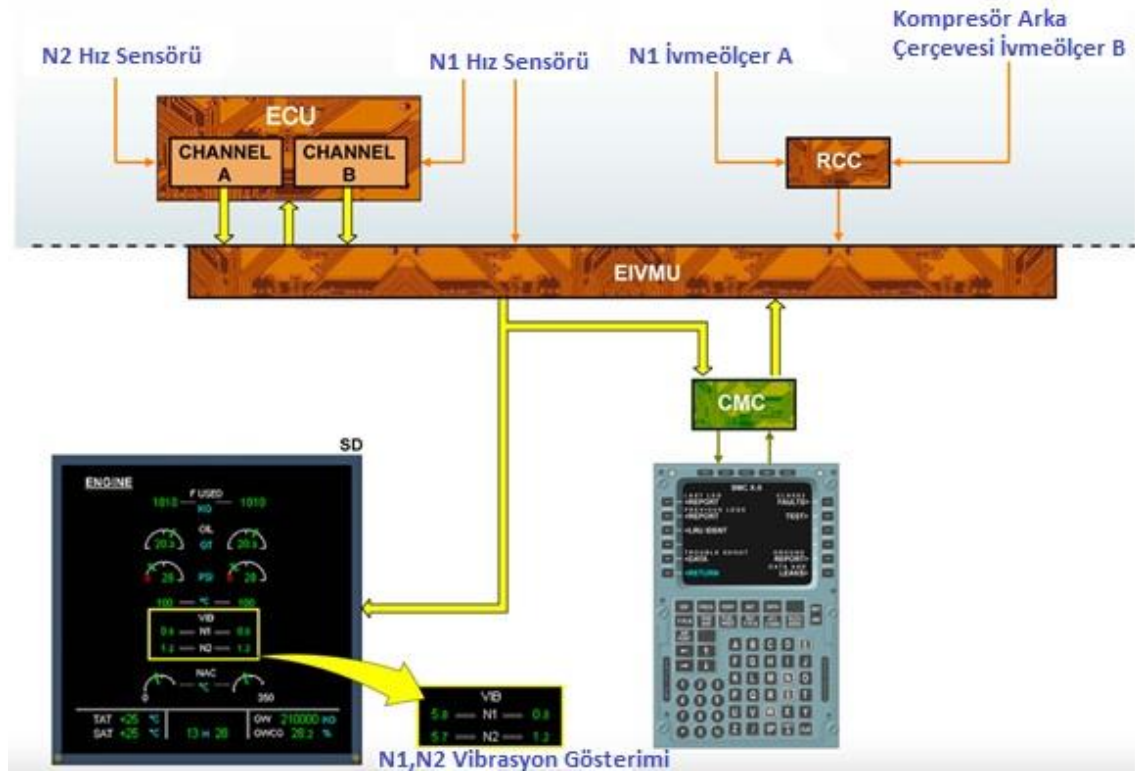
4.1.3. Motor Ara yüzü ve Vibrasyon İzleme Ünitesi

Motor arayüzü ve vibrasyon izleme ünitesi(Engine Interface Vibration Monitoring Unit,EIVMU) motor itki sistemi ile uçak arasında bir ara yüzdür. Vibrasyon izlemek ve görüntülemek için sensörlerden bilgileri almaktadır. Bu bilgiler;

- Motor kontrol ünitesinden iki dijital sinyal; N1 ve N2 hızları
- Üç analog sinyal; N1 hız sensöründen, RCC aracılığıyla N1 yatak titreşim sensöründen (veya ivmeölçer A) ve RCC aracılığıyla kompresör arka çerçeve titreşim sensöründen (ivmeölçer B) [25].

4.1.4. Uzaktan dönüştürücü

Uzaktan dönüştürücü(Remote Charge Converter,RCC) N1 yatağı ivmeölçeri ve CRF ivmeölçerleri ile ara yüz oluşturan bir motor ekipmanıdır. Ana işlevi iki piezo tipi ivmeölçer sinyalini koşullandırmak (hıza entegre etmek) ve bu ön koşullandırılmış sinyalleri güçlendirerek EIVMU'ya göndermektir [25].



Şekil 4.2. Vibrasyon görüntüleme mimari yapısı

Motor ara yüzü ve vibrasyon izleme ünitesi motor itki sistemi ile uçak arasında bir ara yüz olarak ARINC verilerini kokpite göndermektedir. Titreşim göstergesi ECAM ENGINE sayfasında görüntülenir. Saniyede İnç (IPS) cinsinden EIVMU'dan gelen titreşim verileri "kokpit birimleri" içinde 0 ila 10 arasında değiştirilir. EIVMU, N1 yatak titreşim sensörü ve CRF titreşim sensörünün maksimum değerlerinde N1 ve N2 tavsiye değerini kokpit ekibine göstermektedir [25].

N1 ve N2 dijital titreşim değerleri;

- normal çalışmada yeşil renktedir,
- N1 motor titreşimleri 5,7 birimden fazlaysa veya N2 motor titreşimleri 5,6 birimden fazlaysa yeşil titreşimli renktedir (tavsiye seviyesi).

Titreşim değerleri ayrıca ECAM CRUISE sayfasında da görüntülenir.

EIVMU, N1 ve N2 titreşimlerinin bir bakım gerektirecek seviyeye ulaşıp ulaşmadığını da izler:

- N1 bakım seviyesi =6 Milli İnç tüm N1 aralığı için,
- Tüm N2 aralığı için N2 bakım seviyesi =1,7 IPS [25].

4.2. Vibrasyon Giderme Yöntemleri

GE CF6 motorlarında meydana gelen vibrasyonun birçok nedeni olabilmektedir. Öncelikle kök nedeni bulmak, vibrasyonun giderilmesinde büyük bir kolaylık olacaktır. Bu sebeplerin bazılarını sıralayacak olursak;

- Yabancı madde hasarının motor içine çekilmesi ve core bölgesinde meydana verdiği hasarlar
- Kuş çarpması veya başka yabancı maddelerin fan kanatçıklarına çarparak fan kanatçıklarını hasarlaması
- Eski veya yeterince yağlanmamış fan kanatçıkları
- Motor içerisinde unutulmuş eksik ya da gevşek bir bağlantı
- Fan kanatçıklarının değişimi ya da yanlış sıra ile takılması

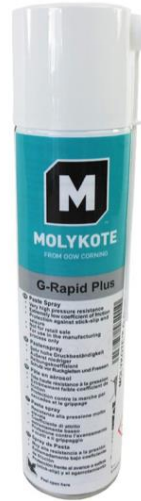
Vibrasyon sonrasında motorda yapılan detaylı kontroller sonrasında bir bulgu bulunmaması durumunda, motor üzerinde vibrasyon giderilme işlemleri ilgili üreticinin vermiş olduğu bakım dokümanları (AMM, TSM vs.) gereği yapılmaktadır

4.2.1. Fan Kanatçıkları Orta Açıklık Bölgesi Yağlaması

Bu prosedürün amacı fan kanadı orta açıklık bölgesinin (mid span) temas eden yüzeylerini yeniden yağlamaktır. Bu yağlamanın amacı, N1 titreşim değerlerinin limitler

dışına çıkmasının ardından uygulanan ve yağlama işlemlerinde daha fazla zaman alan tam fan kanadı yağlama prosedürüne gerek kalmadan motorun çalışmaya devam etmesini sağlamaktır. Orta açıklık bölgesinin temas yüzeylerinin özel kimyasal yağlayıcı ile düzenli/periyojik olarak yeniden yağlanması, motorun istenilen fan dengesi elde etme yeteneğini geliştirecek, N1 titreşimini azaltacak, aşınma kaplaması ömrünü en üst düzeye çıkaracak ve fan kanadı takım işlemlerine yardımcı olacaktır [26].

Bu prosedür sırasında 34 adet fan kanadına sahip GE CF6 motorun fan kanatçıkları motordan sökülmesine gerek kalmadan, motorda takılı pozisyonda yağlamaya olanak sağlamaktadır. Fan kanadı orta açıklık bölgesi genellikle boşluksuz ve sıkıdır. Orta açıklık bölgesinin temas yüzeyleri arasında boşluk elde etmek için ahşap bir çubuk kullanılabilir. Bu çubuk orta açıklık örtüsünün altındaki fan kanatçıklarını arasına koyulmakta ve böylece fan kanatçıklarının birbirine temas yüzeylerinin bakım dokümanında verilen özel bir yağ ile (paste molykote g rapid plus) yağlanması için gerekli boşluğu elde etmek için bir kaldıraç olarak kullanılmaktadır [26].



Şekil 4.3. Yağlama için kullanılan kimyasal

4.2.2. Fan Kanatçıklarının Tam Set Yağlanması

Fan kanatçıkları belirli bakım periyotlarında ve yüksek vibrasyon değerlerinde kontrol amacıyla sökülmektedir. Bu kontroller fan kanatçıklarını içermekle beraber fan kanadının takıldığı (fan disk) yapının kontrollerini de içermektedir. Yapılan kontroller sonucunda bulunan bulgular ölçülerek üretici dokümanının verdiği limitlerle kıyaslanmaktadır. Limit

dışı çıkan fan kanatçıkları yenisi ile değiştirilirken, limit içi hasarlar uçağın yapısal tamir formuna kaydedilerek takibi yapılmaktadır.

Bütün fan kanatçıklarının takım işleminden önce bütün fan kanatçıklarının orta açıklık bölgesinin, fan kanatçıkları kök kısımlarını ve fan kanadının takıldığı yapının (fan disk) yağlanması gerekmektedir.

Yağlayıcı uygulamasının amacı ve hedefi fan kanatçıklarının birbirine ve kanatçığın diske temas eden yüzeyleri bol miktarda yağlayıcı ile kaplamaktır. Böylece yüksek devirlerde dönen fan kanatçıklarının birbirine teması minimum olacak, istenilen vibrasyon değerlerinde motor çalışmaya devam edecektir. Uygulanan yağın kalınlık değerleri bir gereklilik değildir, ancak uygulama, teknisyen tarafından görsel olarak belirlendiği üzere gerekli yüzeyleri sürekli ve sabit bir yağlayıcı kaplamasıyla kaplamalıdır. Yapılan yağlama işlemi rotor dengesini etkileyecek miktarda çok fazla olmamalıdır. Aşırı yüksek yağlama miktarı vibrasyona sebep olabilmektedir. Yağlama işlemi sonucunda motor vibrasyon testine tabi tutularak değerler kontrol edilir [27].

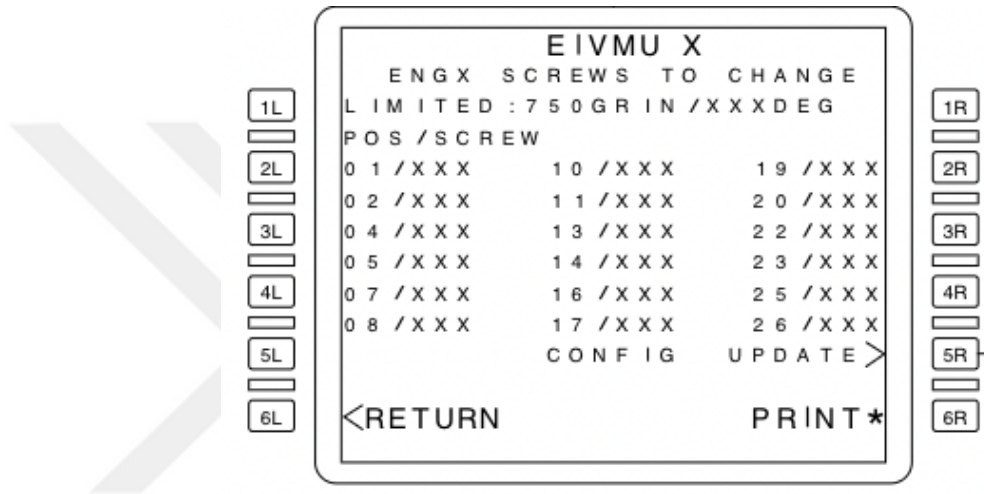
4.2.3. Yerde Balans Ayarlama

GE CF6 motorlarının operasyonel çalışması veya geçici test çalışmaları sırasında N1 titreşim seviyesi 5,7 gösterge biriminden fazla olduğunda motor balans edilmelidir. Prosedür tamamlandıktan sonra önerilen N1 titreşim seviyesi 2,5 birimdir (3 mil). Bu prosedürü uygulamadan önce kullanılacak bazı terimleri bilmek gerekmektedir [28].

- (1) Dengesizlik (U); Mil birimi cinsinden bir numaralı yatak ivmeölçeri tarafından ölçülen motor dengesizliği durumu.
- (2) Faz açısı (A); Motor dengesizliğinin faz açısı MCDU üzerinde gösterilir ve derece cinsinden belirtilir.
- (3) Ağırlık (W1, W2, W3, ...Wx); Gram cinsinden bir terazi düzeltme ağırlığı. Döndürücü konisine takılan balans vidalarıdır.

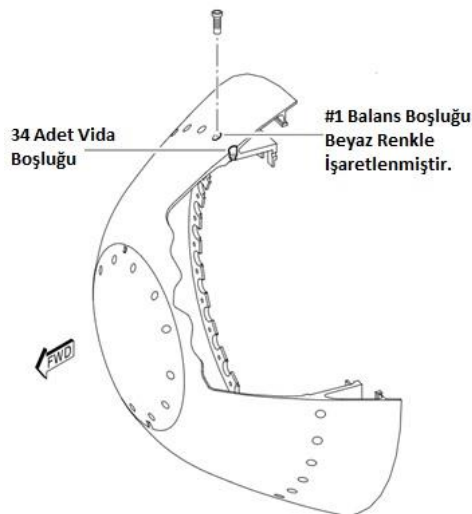
Bu prosedür belirli ağırlıklarda üretilen denge vidalarının fan kanatçıkları önünde bulunan spinner cone yapısını üzerindeki yuvalarına takılması ile motorda meydana gelen vibrasyonu düşürme yöntemidir [28].

Vibrasyon değerleri N1 Şaftının belirli devirlerinde ölçölmektedir. Uçak bilgisayarlarından alınan vibrasyon değerleri, çok amaçlı kontrol ve gösterge ünitesi aracılığı ile gösterilir. Motor ara yüzü ve vibrasyon izleme ünitesi, N1 Şaftı istenilen devirlere ulaştığında, hangi fan kanatçığına denk gelen spinner cone yapısı üzerindeki yuvalara hangi balans denge vidasının atılması gerektiğini MCDU ekranı aracılığı ile bakım ekibine göstermektedir. Bakım ekibi bu değerleri yazdırarak bir sonraki aşama olan dengeleme işleminde geçmektedir.




Şekil 4.4. MCDU ekranında denge vidaları konum gösterimi

Motor çalışması durduktan sonra MCDU ekranından alınan değerler referans alınarak, balans ağırlık vidaları tespit edilen spinner cone üzerindeki yuvalarına takılmaktadır.



Şekil 4.5. Balans denge vidalarının yeri

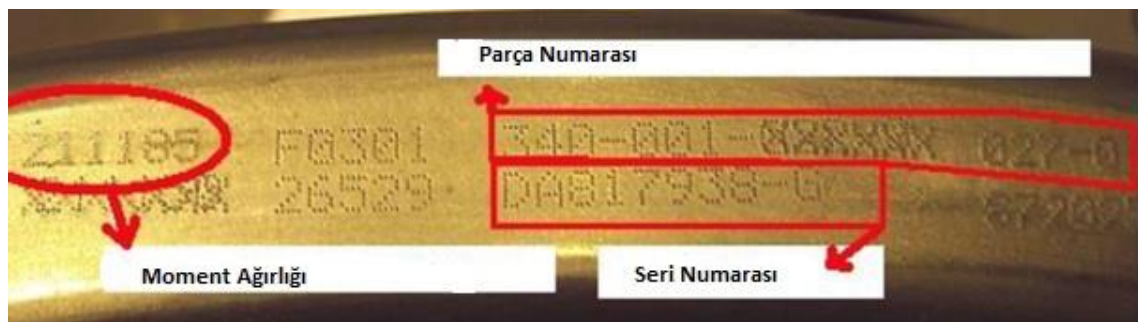
Balans Vidaları					
Vida Numarasının Yazıldığı Bölüm	PO No.	Toplam Uzunluk		Pan Ağırlığı (Gram)	Efektif Ağırlık(Gram)
		INCHES	MM		
	P01	0.18	4.5	8	0
	P02	0.17	4.3	14	6
	P03	0.36	9.2	20	12
	P04	2.82	71.7	26	18
	P05	3.40	86.2	32	24
	P06	3.97	100.8	38	30

Şekil 4.6. Balans denge vidaları

Balans ağırlık vidaları tespit edilen spinner cone üzerindeki yuvalarına takıldıktan sonra ilgili motorda yüksek devirde vibrasyon testi uygulanır. Test sonucunda istenilen vibrasyon değerleri elde edildiğinde prosedür tamamlanmış olur.

4.2.4. Fan Kanatçıklarının Ağırlıklarına Göre Yeniden Ayarlanarak Takılması

Fan kanatçıklarının her birisinin ağırlıkları vardır ve bu ağırlıklar fan kanatçığının kök kısmında yazmaktadır. Takım işlemi sırasında fan kanatçıklarının sırası karıştırılarak yanlış dizilim ile takılması da bazen vibrasyona sebep vermektedir. Bazı durumlarda ise birden fazla fan kanatçığı değişimleri yapılmaktadır. Bu durumda fan kanatçıkları sökülerek ağırlıklarına göre yeniden denge sırasına konulup takılmalıdır. Bu işlem uçak bakım dokümanında (AMM) verilen adımlara göre takılması gerekmektedir.



Şekil 4.7. Fan kanatçığı bilgileri

Bu işlem bazı özel bilgisayar programları ile yapılmakla beraber uçak üzerinde elle de dengeleme işlemi yapılabilmektedir. Öncelikle fan kanatçığının kök kısmında yazan moment ağırlığını belirlemek gerekmektedir. Daha sonra değiştirilen fan kanatçığı seti en

ağırdan en hafife doğru belirli bir sıraya konmaktadır. Takılı olan fan kanatçıklarından en ağır olanları sırası ile çıkarılır ve sıra numarası üzerine bir keçeli kalem ile yazılır. Örneğin; sökülen en ağır fan kanadı 23 numaralı pozisyonda bulunuyorsa, değiştirilecek fan kanatçıkları içinde en ağır olan fan kanadın bulunur ve kanat yüzeyine 23 numara yazılır. Çıkarılan bir sonraki en ağır fan kanadı 6 numaralı pozisyonda bulunuyorsa bu sefer değiştirilecek ikinci en ağır fan kanadının üzerine 6 yazılır. Sıra bu şekilde ilerlemektedir [29].

Daha sonra fan kanatçıklarının denge konumlarının ayarlanması işlemine geçilir. Bunun için I. kadranın (1'den 9'a kadar olan fan kanadı pozisyonları) toplamlarını III. kadranla (18'den 26'ya kadar olan fan kanadı pozisyonları) karşılaştırın. II. kadranla (10 ila 17'ye olan fan kanadı) toplamlarını kadran IV (fan kanadı pozisyonları 27 ila 34) ile karşılaştırılır [29].

Motor Seri No	Orjinal Fan Blade			Değişen Fan Blade			Orjinal Fan Blade			Değişen Fan Blade		
	BLD POS	CL CODE	Moment Ağırlık	Moment Ağırlık	CL CODE	BLD POS	CL CODE	Moment Ağırlık	Ağırlık Farklılığı	Moment Ağırlık	CL CODE	
K A D R A N 1	1					K A D R A N 3	18					
	2						19					
	3						20					
	4						21					
	5						22					
	6						23					
	7						24					
	8						25					
	9						26					
K A D R A N 2	10					K A D R A N 4	27					
	11						28					
	12						29					
	13						30					
	14						31					
	15						32					
	16						33					
	17						34					

Şekil 4.8. Fan kanatçığı değişim tablosu

Her bir fan kanatçığı setinin kadran 1,2,3 ve 4 de toplam moment ağırlığı değişiminin 100gr inç den daha az olması beklenir. Bunu sağlayarak fan kanatçıkları yeniden ağırlıklarına göre sıralanmış olur ve takım işlemleri yapılabilir [29].

5. BÖLÜM

GE CF6 MOTORLARINDA BALANS DENGE VIDALARI VE YAĞLAMA İŞLEMLERİ İLE VİBRASYON GİDERME UYGULAMASI

Bu bölümde yüksek vibrasyona sahip bir GE CF6 motorunun, tam set fan kanatçıkları yağlama işlemi ile balans denge vidaları kullanılarak vibrasyondaki değişimler gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler, motor sağlığına ve güvenli çalışma ömrüne önemli ölçüde katkıda bulunmakla birlikte, uygulanan yöntemlerin süresi, havacılık operasyonlarında çok önemli olan zaman kavramı için bakım kuruluşlarına bir yol gösterici olması beklenmektedir.

5.1. Yüksek Vibrasyona Sahip Bir GE CF6 Motor Modeli

Güvenli ve verimli bir uçak motorunun, uçuş ömrü boyunca, uçuşun bütün fazlarında en iyi performans değerlerini vermesi beklenmektedir. Bu değerleri almak ise ancak düzenli ve periyodik bakımlarla mümkündür.

GE CF6 motorlarının fan kanatçıkları yüksek devirlerde dönüş sırasında titreşimlere maruz kalmaktadır. Bu titreşimleri azaltılıp belirli limitler altına almak hem motor performansını hem de hem de motorun çalışma ömrünü arttıracaktır.

Bu çalışmada yüksek vibrasyon değerlerine ulaşan bir GE CF6 motorunun fan kanatçıkları balans denge ağırlık vidaları kullanılarak vibrasyon azaltma yöntemi uygulanacaktır. Yüksek devirde motor çalıştırma işlemi ile vibrasyondaki azalma gözlemlenecektir. Daha sonra ilgili motora takılan balans denge vidaları tekrar sökülerek eskileri yeniden takılacak, böylece aynı yüksek vibrasyon değerinde olan motorda tam set olarak yağlama prosedüre uygulanıp vibrasyon testi ile yağlama işlemi sonucunda

vibrasyon değişimi gözlemlenecektir. Elde edilen veriler birbiri ile karşılaştırılıp uygulanan yöntemlerin ne derece etkili olduğu tespit edilecektir.

Bakıma giren bir A330 uçağının GE CF6 motoru bakım girişinde uygulanan motor çalıştırma testi ile yüksek vibrasyon değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

DATE	OCT 16	MAINTENANCE		CHCI PRINTING	
FLT NBR	TTTEST	SYSTEM REPORT/TEST		PAGE 01/01	
FROM/TO	LTBA/LTBA	EIVMU1		DATE OCT 16	
START/END	1542/1554	READ GRND ACQN		UTC 1559	
			1/2		
N1	ACCELEROMETER		N1	ACCELEROMETER	
(%)	A (MILS/DEG)	B	(%)	A (MILS/DEG)	B
66	1.5/ 26	1.4/285		N/A	
76	1.7/ 19	1.4/290		N/A	
81	1.8/ 8	1.7/302		N/A	
87	2.6/ 35	2.4/ 15		N/A	
92	3.0/ 38	3.0/ 49		N/A	
96	3.2/ 69	3.1/ 73		N/A	
			2/2		

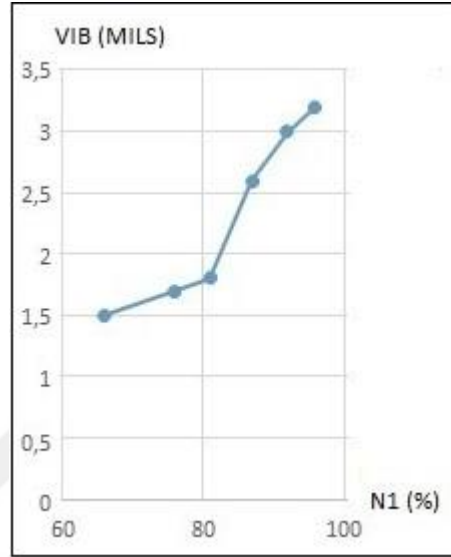
şekil 5.1. Bakım girişi N1 devirlerine göre vibrasyon değerleri

HW PN	SW PN	SN
2234340-02-02	D1033GE04CAEA02	QB00435
ACMS: ALPHA CALL-UP 1/8		
ALPHA SOURCE POS		
_ESN	DMU 1:	811370
(SERIAL #)	2:	000000
_N1	EIVMU1 1:	98.11
(% RPM)	2 2:	83.06
_N2	EIVMU1 1:	103.30
(% RPM)	2 2:	93.18
_VIB1	EIVMU1 1:	3.2
(UNIT)	2 2:	2.1
_VIB2	EIVMU1 1:	1.9
(UNIT)	2 2:	1.6
<RETURN		PRINT*

şekil 5.2. Bakım girişinde ölçülen vibrasyon değeri

GE CF6 motorunda bakım girişinde yapılan motor çalıştırma testleri sırasında ölçülen vibrasyon değeri düşük basınç rotoru (N1) %98,11 devirdeyken bir numaralı motora ait olan motor ara yüzü ve vibrasyon izleme ünitesi 1 tarafından motorun vibrasyon değeri VIB1: 3.2 MILS olarak ölçülmüştür.

Yapılan bu çalışmada bakım girişi motor çalıştırma testleri sırasında EIVMU 1 tarafından kaydedilen N1 %66, %76, %81, %87, %92 ve %96 devirlerindeki vibrasyon değerlerinin logaritmik bir şekilde arttığı görülmektedir.



Şekil 5.3. Bakım girişi N1 devrine göre vibrasyon değişim grafiği

Yapılan bu çalışmada ayrıca bakım girişinde yapılan motor çalıştırma testleri sırasında N1 %98 devrindeyken ölçülen EGT değeri 1 numaralı motor için 421 °C ve yakıt akışı (FF) 644 kg/saat olarak ölçülmüştür.

HW PN	SW PN	SN
2234340-02-02	D1033GE04CAEA02	QB00435
ACMS: ALPHA CALL-UP 2/8		
ALPHA SOURCE POS		
_EGT	EIVMU1 1:	421
(DEG C)	2 2:	418
_FF	EIVMU1 1:	644
(KG/HR)	2 2:	621
-		
-		
-		
<RETURN		
PRINT*		

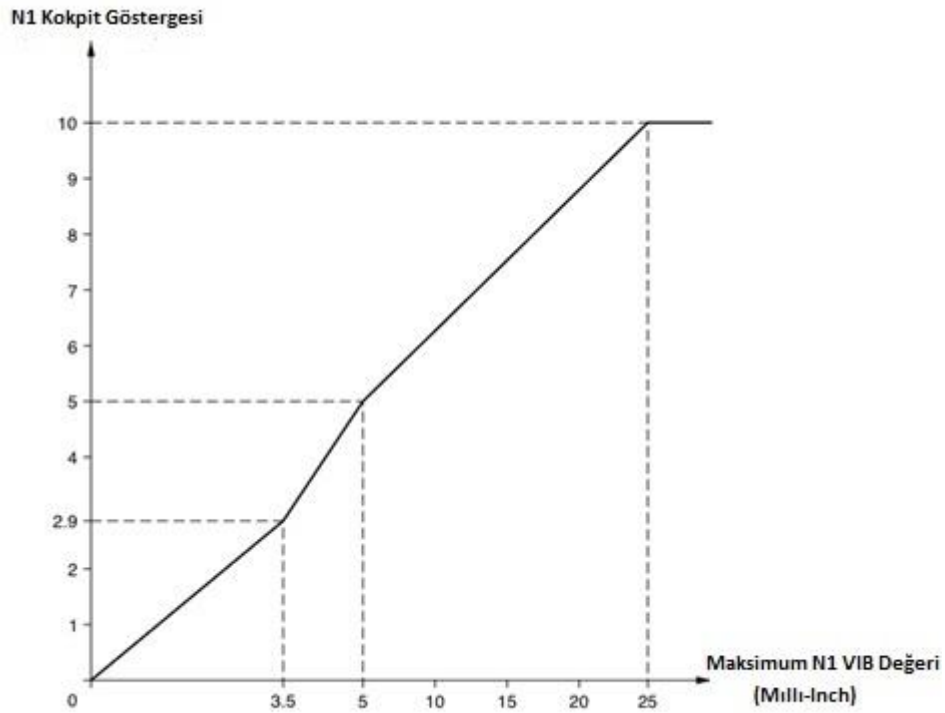
Şekil 5.4. Bakım girişi EGT ve FF değerleri

Aslında ölçülen bu VIB1: 3.2 MILS değer üretici firma bakım dökümanlarında limit dahilinde olan bir değerdir. Ancak üretici firmanın vermiş olduğu limit aralıkları daha

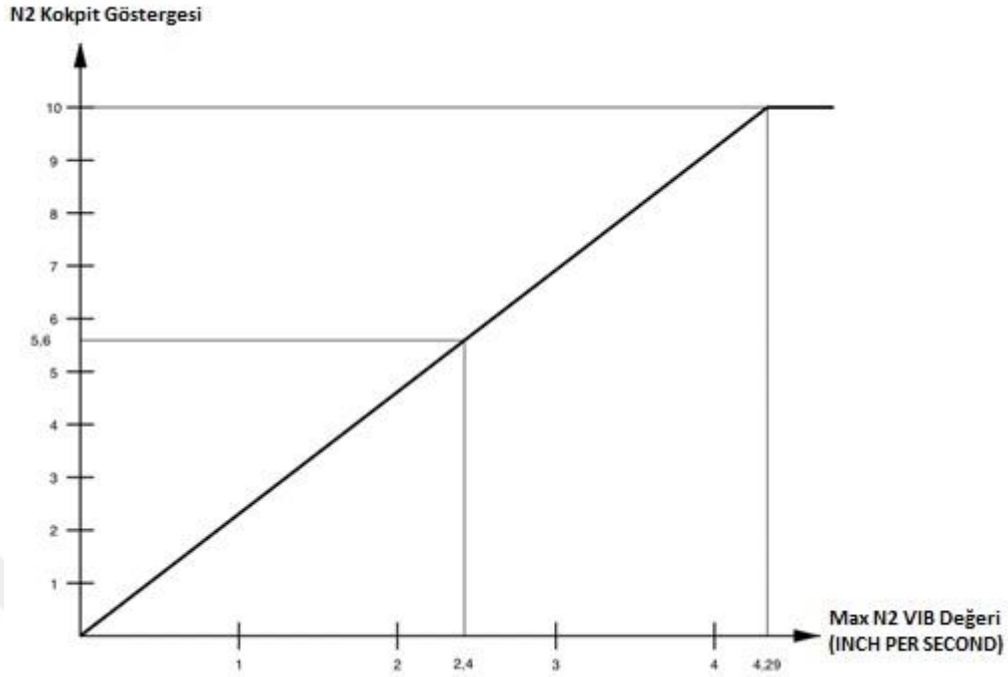
geniş olmakla birlikte operatör bakım organizasyon (Maintenance Organisation Exposition,MOE) dökümanlarında bu limitlerde daha da kısıtlayıcı olabilmektedirler. Bu sebeple ölçülen bu vibrasyon değerinin düşürülmesi beklenmektedir.

Vibrasyon değerleri çok amaçlı kontrol ve gösterge ünitesinde N1 için MILS biriminden N2 için IPS biriminden gösterilmektedir. Elektronik merkezli hava taşıt modülü (ECAM) gösterge panelinde ise N1 ve N2 için UNIT cinsinden gösterilmektedir. İlgili birimlerin dönüşümleri için üretici bakım dokümanları kontrol edilmektedir.

IPS, titreşim hızını ölçmek için kullanılan bir ölçü birimi olan saniyede İnç anlamına gelir. Titreşim izleme bağlamında, IPS genellikle titreşen bir nesnenin veya yapının saniyede inç cinsinden yer değiştirme hızını ölçmek için kullanılır [30].



Şekil 5.5. N1 MCDU-ECAM değerleri



Şekil 5.6. N2 MCDU-ECAM değerleri

Vibrasyon değerinin düşürülmesi için iki farklı yöntem kullanılacaktır. İlk olarak balans denge vida ağırlıkları kullanılarak vibrasyonun hangi oranda düşürüldüğü tespit edilecektir. Daha sonra yeni takılan balans denge vidaları, yeniden sökülerek eski balans denge vidaları takılıp bu sefer tam set fan kanatçıkları yağlaması yapılacaktır. Yağlama işlemi sonucunda da vibrasyon testi yapılacak olup vibrasyonun hangi oranda düşürüldüğü tespit edilecek ve hangi yöntemin daha etkin ve efektif olduğu irdelenip kıyaslanacaktır.

5.2. Balans Denge Ağırlık Vidaları Kullanılarak Vibrasyon Düşürme

Balans denge ağırlık vidaları kullanılarak yapılacak vibrasyon düşürme işlemi GE CF6 motorlarında vibrasyon düşürmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, Motor arayüzü ve titreşim izleme ünitesi tespit etmiş olduğu değerler çok amaçlı kontrol ve gösterge ünitesinde tarafından gösterilerek fan trim ayarı yapılmaktadır.

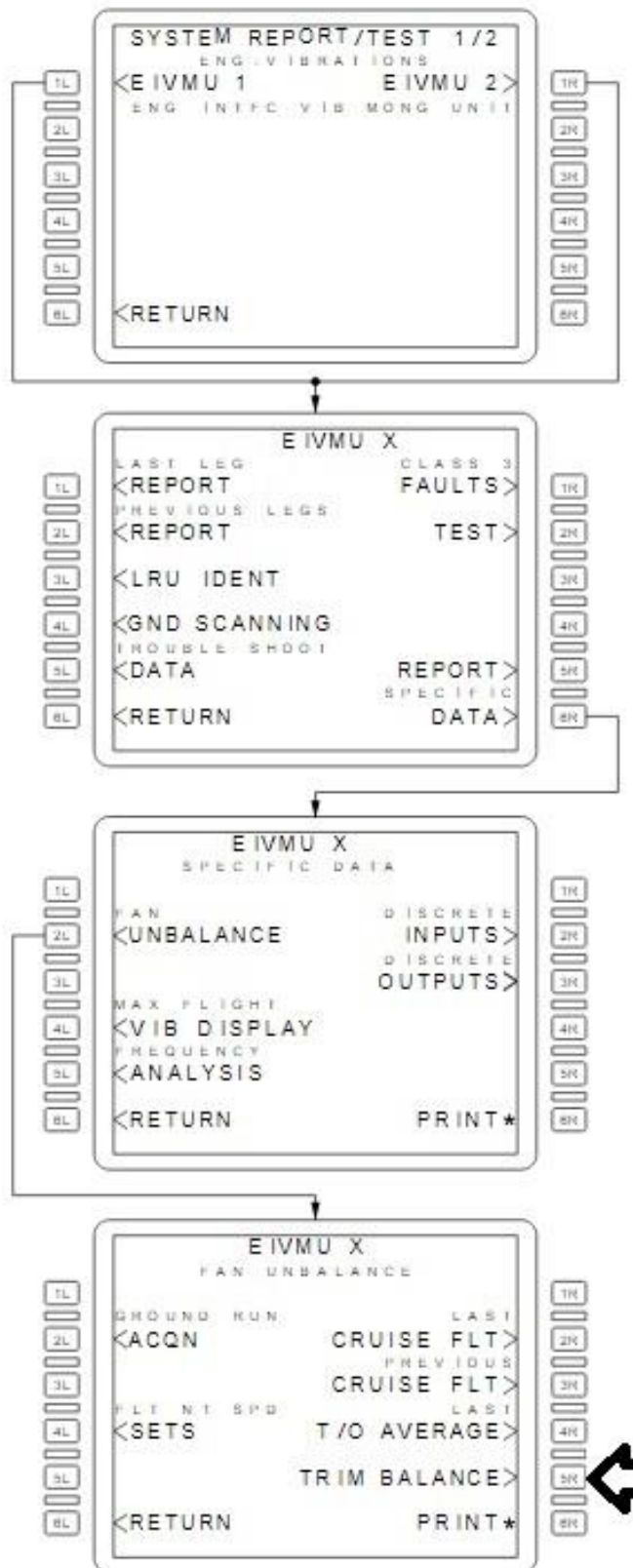
Yapılacak olan bu işlemde belirli ağırlığa sahip denge vidalarının çok amaçlı kontrol ve gösterge ünitesi kullanılarak spinner cone üzerinde hangi yuvaya takılacağı tespit edilecektir.

İlgili motorun vibrasyon değeri çok amaçlı kontrol ve gösterge ünitesinde VIB1: 3.2 MILS olarak ölçülmüştür. Bu değeri düşürmek için öncelikle denge ağırlık vidaları kullanılacaktır.

Çok amaçlı kontrol ve gösterge ünitesinde kullanılacak denge vidalarının gösterilmesi için motorun belirli devirlerde çalışması gerekmektedir. Bu değerler üretici bakım dökümanında verilmiştir. GE CF6 motorlarında yer verileri için, aşağıdaki 6 hızdan 5'inde elde edilen en az 5 vibrasyon veri seti: 67, %76, %80, %88, %92, %96N1 gereklidir [31].

Öncelikle istenilen N1 seviyelerine çıkıldığında çok amaçlı kontrol ve gösterge ünitesinde da motor sayfasına girilmiştir. Buradan hangi motorda işlem yapılacaksa o motorun motor arayüzü ve titreşim izleme ünitesi sekmesine girilmiştir. Sırasıyla özel veriler, fan dengesizliği ve trim balans sekmesine girilerek hangi ağırlıktaki denge vidalarının spinner cone üzerindeki hangi yuvaya takılması gerektiği belirlenmiştir.

Bu yöntem bir numarada takılmış olan GE CF6 motorunda uygulanmıştır. N1 %98 devrine ulaştığında elde ettiğimiz veriler VIB1: 3,2 olarak ölçülmüştür. Bunun için yine çok amaçlı kontrol ve gösterge ünitesi aracılığı ile kullanılacak denge vidalarının spinner cone üzerindeki hangi yuvaya takılması gerektiği belirlenmiştir.



Şekil 5.7. Trim balans MCDU ulaşımı



Şekil 5.8. MCDU ağırlık denge vidaları pozisyonu

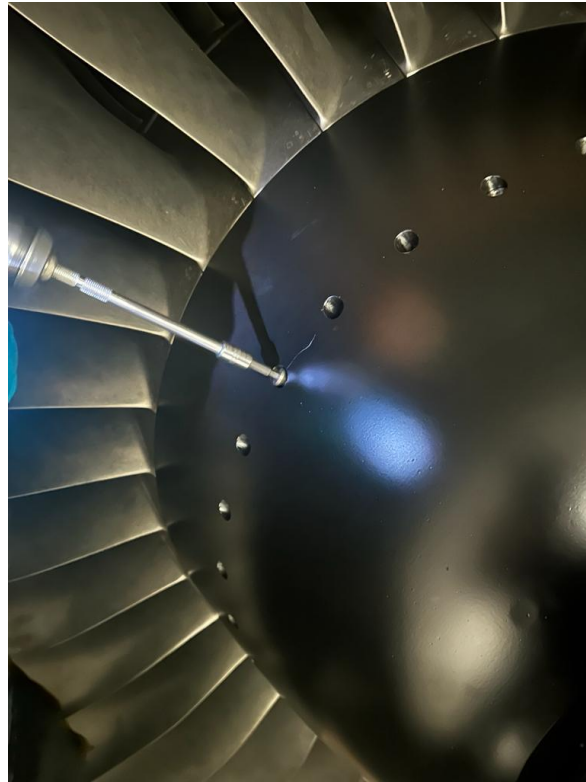
Çok amaçlı kontrol ve gösterge ünitesi aracılığıyla belirlene ve kullanılması gereken denge ağırlık vidaları ve konumları şu şekildedir;

- 11 numaralı fan kanatçığına P01 kodlu denge vidası
- 12 numaralı fan kanatçığına P05 kodlu denge vidası
- 13 numaralı fan kanatçığına P04 kodlu denge vidası
- 14 numaralı fan kanatçığına P06 kodlu denge vidası
- 15 numaralı fan kanatçığına P06 kodlu denge vidası
- 20 numaralı fan kanatçığına P06 kodlu denge vidası

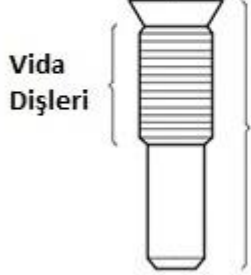


Şekil 5.9. Denge vidaları

N1 belirli devrinde tespit ettiğimiz bu değerlerden sonra motorun çalışması sonlandırılarak denge ağırlık vidalarının takım işlemleri spinner cone üzerinde ilgili yuvalarına yapılmıştır. Takım işlemi üretici dökümanında verilen bilgilere göre yapılmakta olup takılan bu vidalar belirli tork değerlerinde sıkılmaktadır. Yaptığımız bu işlemde takmış olduğumuz denge ağırlık vidalarının tork değeri 75-100 lbf.in arasında değişmektedir [32].



Şekil 5.10. Denge vidaları takımı

Balans Vidaları					
Vida Numarasının Yazıldığı Bölüm	P0 No.	Toplam Uzunluk		Pan Ağırlığı (Gram)	Efektif Ağırlık(Gram)
		INCHES	MM		
	P01	0.18	4.5	8	0
	P02	0.17	4.3	14	6
	P03	0.36	9.2	20	12
	P04	2.82	71.7	26	18
	P05	3.40	86.2	32	24
	P06	3.97	100.8	38	30

MEVCUT VİDALAR							
P0 No.	P01	P02	P03	P04	P05	P06	
P01	0	6	12	18	24	30	
P02	6	0	6	12	18	24	
P03	12	6	0	6	12	18	
P04	18	12	6	0	6	12	
P05	24	18	12	6	0	6	
P06	30	24	18	12	6	0	

Şekil 5.11. Denge ağırlık vidaları özellikleri

Denge ağırlık vidaları çok amaçlı kontrol ve gösterge ünitesi aracılığı ile spinner cone üzerindeki hangi delikleri takılacağı belirlenmiştir. Takım işlemleri tamamlandıktan sonra yeniden yüksek devirlerde vibrasyon testi uygulanmıştır.

6. Item:		7. Description:		8. Part Number:		9. Quantity:		10. Serial Number:		11. Status/Work	
1		BOLT, BAL WT		2013M80P06		10		N/A		NEW	
2		SCREW, BAL WT		1703M22P01		30		N/A		NEW	
3		BOLT, TORX		1651M72P01		100		N/A		NEW	
AIRWORTHINESS APPROVAL - ARTICLE											
12. Remarks:											
13a. Certifies the items identified above were manufactured in conformity to:						14a. <input type="checkbox"/> 14 CFR 43.9 Return to Service <input type="checkbox"/> Other regulation specified in Block 12					
<input checked="" type="checkbox"/> Approved design data and are in a condition for safe operation.						Certifies that unless otherwise specified in Block 12, the work identified in Block 11 and described in Block 12 was accomplished in accordance with Title 14, Code of Federal Regulations, part 43 and in respect to that work, the items are approved for return to service.					
<input type="checkbox"/> Non-approved design data specified in Block 12.											
13b. Authorized Signature:			13c. Approval/Authorization No:			14b. Authorized Signature:			14c. Approval/Certificate No.:		
<i>Rajesh Sharma</i>			PC108								
13d. Name (Typed or Printed)			13e. Date (dd/mm/yyyy):			14d. Name (Typed or Printed):			14e. Date (dd/mm/yyyy):		
SHARMA, RAJRSH K			12 DEC 2022								
User/Installer Responsibilities											
<p>It is important to understand that the existence of this document alone does not automatically constitute authority to install the aircraft engine/propeller/article.</p> <p>Where the user/installer performs work in accordance with the national regulations of an airworthiness authority different than the airworthiness authority of the country specified in Block 1, it is essential that the user/installer ensures that his/her airworthiness authority accepts aircraft engine(s)/propeller(s)/article(s) from the airworthiness authority of the country specified in Block 1.</p> <p>Statements in Blocks 13a and 14a do not constitute installation certification. In all cases, aircraft maintenance records must contain an installation certification issued in accordance with the national regulations by the user/installer before the aircraft may be flown.</p>											
FAA Form 8130-3 (02-14)						NSN:0052-00-012-9005					
Paperwork Reduction Act Statement:											
An agency may not conduct or sponsor and a person is not required to respond to, a collection of information unless it displays a currently valid OMB control number associated with this collection of information is 2120-0018. Comments concerning the accuracy of this burden and suggestions for reducing the burden should be directed to the FAA at 800 Independence Ave. SW, Washington, DC 20591, Attn: Information Collection Clearance Officer, ABA-20.											

Şekil 5.12. Balans vidaları serifikası

DATE	OCT 16	MAINTENANCE		CMC1 PRINTING
FLT NBR	TTTEST	SYSTEM REPORT/TEST		PAGE 01/01
FROM/TO	LTBA/LTBA	EIVMU1		DATE OCT 16
START/END	1627/1635	READ GRND ACQN		UTC 1639

1/2			2/2		
N1	ACCELEROMETER		N1	ACCELEROMETER	
(%)	A (MILS/DEG)	B	(%)	A (MILS/DEG)	B
66	0.1/20	0.1/282		N/A	
76	0.3/16	0.2/296		N/A	
81	0.6/6	0.4/302		N/A	
87	0.6/31	0.4/15		N/A	
92	0.7/37	0.6/44		N/A	
96	0.7/68	0.7/71		N/A	

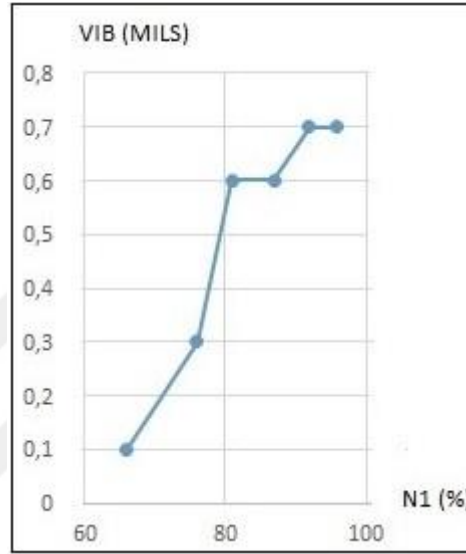
Şekil 5.13. Balanslama sonrası N1 devirlerine göre vibrasyon değerleri

HW PN	SW PN	SN
2234340-02-02	D1033GE04CAEA02	QB00435
ACMS: ALPHA CALL-UP 1/8		
ALPHA SOURCE POS		
_ESN	DMU	1: 811370
(SERIAL #)		2: 000000
_N1	EIVMU1	1: 98.70
(% RPM)) 2	2: 80.04
_N2	EIVMU1	1: 103.39
(% RPM)) 2	2: 96.35
_VIB1	EIVMU1	1: 0.7
(UNIT)) 2	2: 2.1
_VIB2	EIVMU1	1: 1.9
(UNIT)) 2	2: 1.4
<RETURN		PRINT*

Şekil 5.14. Balanslama sonrası N1 VIB değeri

Denge ağırlık vidaları kullanılmadan önce yapılan yüksek takat motor çalıştırma testlerinde N1 vibrasyon değeri 3.2 MILS ölçülmüşken denge vidaları kullanımından sonra yapılan testlerde N1 vibrasyon değerinin 0.7 MILS olduğu görülmüştür. Bu da yapılan balans denge ağırlık vidalarının kullanımının vibrasyonu önemli ölçüde düşürdüğünün bir göstergesidir.

Yapılan bu çalışmada balans ağırlık denge vidalarının kullanımı sonrasında yapılan yüksek takat motor çalıştırma testleri sırasında EIVMU 1 tarafından kaydedilen N1 %66, %76, %81, %87, %92 ve %96 devirlerindeki vibrasyon değerlerinin logaritmik artışının önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.15. Balanslama sonrası vibrasyon değişim grafiği

Balanslama işlemi sonrası yapılan yüksek takat motor çalıştırma testleri sırasında N1 %98 devrindeyken ölçülen EGT değeri 1 numaralı motor için 365 °C ve ölçülen yakıt akışı (FF) 556 kg/saat olarak ölçülmüştür.

```

HW PN          SW PN          SN
2234340-02-02 D1033GE04CAEA02 QB00435
ACMS: ALPHA CALL-UP 2/8
ALPHA SOURCE POS
_EGT  EIVMU1 1: 365
(DEG C ) 2 2: 381
_FF   EIVMU1 1: 556
(KG/HR ) 2 2: 561
-
-
-
<RETURN          PRINT*

```

Şekil 5.16. Balanslama sonrası EGT ve FF değerleri

Elde edilen veriler incelendiğinde balans denge vidalarının kullanımından sonra yapılan yüksek takat motor testleri sonucunda 1 numaralı motorda vibrasyon değerlerinin azalması ile birlikte EGT değerlerinde %13,3 azalma elde edilirken yakıt akışında yaklaşık (FF) %13,6 azalma gözlemlenmiştir.

Yapılan bu balanslama ve motor çalıştırma işlemi toplamda 4 kişiyle yapılmış olup 6 saat sürmüştür. Toplam harcanan adam saat miktarı 24 adam/saattir.

5.3. Fan Kanatçıklarının Yağlanması İle Vibrasyon Düşürme

Balans denge ağırlık vidasının kullanımının vibrasyon üzerinde etkisi tespit edildikten sonra, fan kanatçıklarının yağlanması ile vibrasyon değerlerinin değişiminin tespit edilmesi amacıyla ilgili motorda takılan balans denge vidaları tekrar sökülerek eskileri takılmıştır.

Bakım kartı gereği bir numaralı GE CF6 motorunda fan kanatçıklarının kontrolü ve yağlama işlemi uygulanmıştır. Bunun için öncelikle 34 adet fan kanatçığı bakım dokümanında verilen işlem adımlarına göre teker teker sökülüp özel kimyasal temizlik sıvısı ile temizlenmiştir. Daha sonra 34 adet fan kanadı tek tek kontrol edilerek hasar durumları incelenmiştir.

Fan kanatçıklarında meydana gelen genel hasarların başında özellikle fan kanadı hücum kenarında FOD çarpmalarından kaynaklı çizikler ile göçükler gelmektedir. Bunların konumu ve boyutları bakım dokümanında verilen hasar limitinin belirlenmesinde kullanılır. Limit dışı fan kanatları yenisi ile değiştirilirken limit içi olanlar bakım işlemi görerek, yapısal tamir kayır formuna kaydedildikten sonra yeniden takılabilirler.

Fan kanatçıklarında yağlama işlemi için kullanılan yağlayıcı kimyasal maddesi bakım dokümanında da verilen Rapid Plus Molykote kullanılmıştır.



Şekil 5.17. Kullanılan yağlayıcı kimyasal

Fan kanatçıklarında yapılan yağlama işlemi sadece fan kanatçıklarının yağlanması ile kalmayıp ayrıca fan kanatçıklarının takıldığı rotor disk bölgesinin ve fan kanatçığının rotora takılan bağlantılı elemanlarını da içermektedir. Yağlama işleminde yağlanacak olan bölümleri şu şekilde sıralayabiliriz;

- Rotor diski fan kanatçık yuvaları
- Fan kanatçığı orta açıklık bölgesi ve temas yüzeyleri
- Fan kanatçığı kök kısımları
- Bağlantı elemanları (spacer,retainer,keys)

Fan kanadı kök kısmının yağlanması;



Şekil 5.18. Fan kanadı kök kısmının yağlanması

- Bağlantı elemanları (spacer,retainer,keys) ;



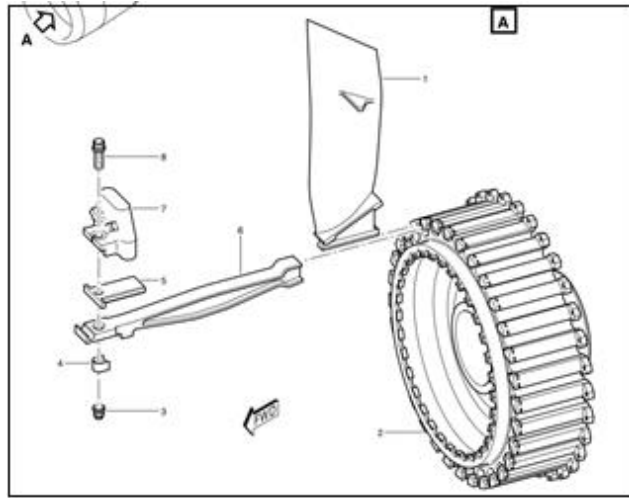
Şekil 5.19. Bağlantı elemanları yağlanması

- Orta açıklık bölgesinin yağlanması;



Şekil 5.20. Orta açıklık bölgesinin yağlanması

Kontrolleri yağlama işlemini tamamladığımız GE CF6 motorunun fan kanatçıkları artık takıma hazır gelmiştir. Yine bakım dokümanının vermiş olduğu işlem adımları takip edilerek fan kanatçık takım işlemleri yapılmıştır.



Şekil 5.21. Fan kanadı takım mimarisi

Fan kanatçıklarının yağlama ve takım işlemlerinin sonunda yüksek devirde motor çalıştırma yapılarak vibrasyon testi yapılmış. Test sonucunda elde edilen verilerin vibrasyonu düşürmede ne derece etkili olduğunu belirlemede önemli derece katkı verecektir.

Motorun bakıma ilk geldiği zaman yapılan vibrasyon testinde bir numarada takılmış olan GE CF6 motorunda N1 % 98 devrine ulaştığında elde ettiğimiz veriler VIB1: 3,2 MILS olarak ölçülmüştü. Daha sonra yapılan fan kanatçıkları yağlama işlemi sonrasında yüksek devirlerde motor çalıştırma işleminde ölçülen VIB1: 1.2 MILS olarak gözlemlenmiştir.

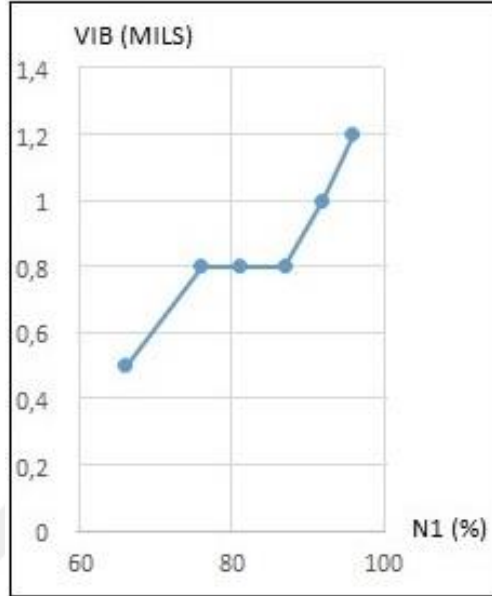
DATE	DEC01	MAINTENANCE		CMC1 PRINTING
FLT NBR	TTTEST	SYSTEM REPORT/TEST		PAGE 01/01
FROM/TO	LTBA/LTBA	EIVMU1		DATE DEC01
START/END	1722/1736	READ GRND ACQN		UTC 1754
		1/2		
N1	ACCELEROMETER		N1	ACCELEROMETER
(%)	A (MILS/DEG) B		(%)	A (MILS/DEG) B
66	0.5/22 0.1/280			N/A
76	0.8/15 0.4/298			N/A
81	0.8/9 0.2/308			N/A
87	0.8/35 0.2/16			N/A
92	1.0/39 0.2/46			N/A
96	1.2/65 0.4/75			N/A
		2/2		

Şekil 5.22. Fan kanatçıkları yağlama sonrası N1 devirlerinde vibrasyon değerleri

HW PN	SW PN	SN
2234340-02-02	D1033GE04CAEA02	Q800435
ACMS: ALPHA CALL-UP 1/8		
ALPHA SOURCE POS		
ESN DMU	1:	811370
(SERIAL #)	2:	000000
N1 EIVMU1	1:	98.16
(% RPM)	2:	80.06
N2 EIVMU1	1:	103.70
(% RPM)	2:	96.98
VIB1 EIVMU1	1:	1.2
(UNIT)	2:	2.2
VIB2 EIVMU1	1:	1.9
(UNIT)	2:	1.4
<RETURN		PRINT*

Şekil 5.23. Yağlama işlemi sonrası N1 VIB değeri

Elde edilen veriler incelendiğinde vibrasyon değerlerinde logaritmik artışın azaldığı görülmüştür.



Şekil 5.24. Fan kanatçıkları yağlama sonrası vibrasyon değişim grafiği

Balanslama işlemi sonrası yapılan yüksek takat motor çalıştırma testleri sırasında N1 %98 devrindeyken ölçülen EGT değeri 1 numaralı motor için 399 °C ve ölçülen yakıt akışı (FF) 599 kg/saat olarak ölçülmüştür.

```

HW PN          SW PN          SN
2234340-02-02 D1033GE04CAEA02 QB00435
ACMS: ALPHA CALL-UP 2/8
ALPHA SOURCE POS
_EGT  EIVMU1 1: 399
( DEG C ) 2 2: 402
_FF   EIVMU1 1: 599
( KG/HR ) 2 2: 593
-
-
-
<RETURN          PRINT*

```

Şekil 5.25. Fan kanatçıkları yağlaması sonrası EGT ve FF değerleri

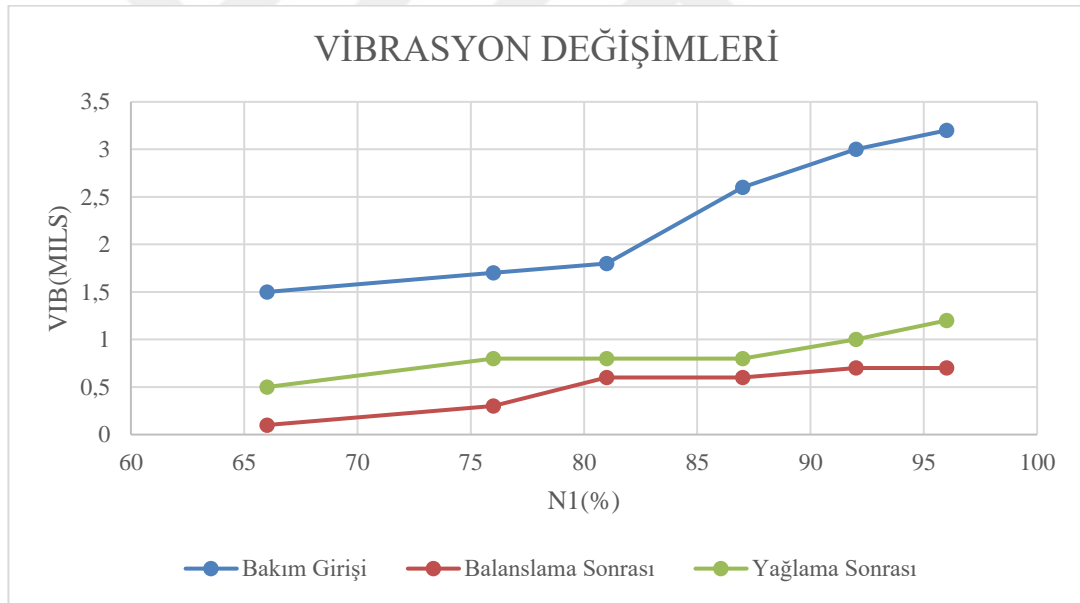
Yapılan bu çalışmada elde edilen veriler incelendiğinde fan kanatçıkları yağlama işleminden sonra yapılan yüksek takat motor testleri sonucunda 1 numaralı motorda

vibrasyon değerlerinin azalması ile birlikte EGT değerlerinde %5,2 azalma elde edilirken yakıt akışında yaklaşık (FF) %6,9 azalma gözlemlenmiştir.,

Tablo 5.1. EGT ve FF değerleri karşılaştırma

	EGT °C	FF (KG/HR)	EGT DEĞİŞİMİ (%)	FF DEĞİŞİMİ (%)
Bakım Girişi	421	644	-	-
Balanslama Sonrası	365	556	13,3	13,6
Yağlama Sonrası	399	599	5,2	6,9

Yapılan bu fan kanatçıkları sökümü, temizliği, kontrolleri, yağlanması, tekrardan takılması ve motor çalıştırma işlemi toplamda 4 kişiyle yapılmış olup 16 saat sürmüştür. Toplam harcanan adam saat miktarı 64 adam/saattir.



Şekil 5.26. Vibrasyon değişimleri

Böylece bu çalışmada aynı vibrasyon değerinde fan kanatçık ağırlık denge vidaları kullanılarak ve yağlama işlemleri yapılarak vibrasyondaki değişimlerin yanı sıra, EGT ve yakıt akışındaki (FF) değişimler gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler, yapılan işlemlerin ne derece etkili olduğunu, harcanan adam/ saatin ve kullanılan malzemelerin maliyeti ile karşılaştırılarak, bakım kuruluşları için en etkili ve verimli yöntemin tespiti için bir yol gösterici olacağı beklenmektedir.

6. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuç

Günümüz ticari türbin motorların verimliliğini arttırmak hem de uçuş ömrü boyunca en iyi performansı vermesi için düzenli ve periyodik bakımlarının yapılması çok önemlidir. Bazen yanlış ve eksik bakım bazen de dış faktörler nedeniyle GE CF6 motorlarında vibrasyonlar gözlemlenebilmektedir. Bu vibrasyonların giderilmesi ve belirli limitler içerisinde tutulması yolcu ve uçak sağlığı açısından büyük önem arz etmektedir. Çalışma ömrü boyunca mekanik yüklere maruz kalan fan kanatçıkları düzenli periyodik kontrollere tutularak düşük vibrasyon değerlerinde çalışması beklenmektedir.

Bu çalışmada bakım giriş testleri sırasında yüksek vibrasyon değerlerine sahip bir GE CF6 motoruna, balans denge ağırlık vidaları kullanılarak vibrasyon değişimi gözlemlenmiştir. İlgili motorun vibrasyon değeri çok amaçlı kontrol ve gösterge ünitesinde VIB1: 3.2 MILS olarak ölçülmüştür. Bu değeri düşürmek için öncelikle denge ağırlık vidaları kullanılmıştır.

Motor Ara yüzü ve Titreşim İzleme Ünitesi tespit etmiş olduğu değerler ve kullanılması gerek balans denge ağırlık vidaları çok amaçlı kontrol ve gösterge ünitesinde tarafından gösterilerek fan trim ayarı yapılmıştır. Denge ağırlık vidaları kullanılmadan önce yapılan yüksek takat motor çalıştırma testlerinde N1 vibrasyon değeri 3.2 MILS ölçülmüşken denge vidaları kullanımından sonra yapılan yüksek takat motor testlerinde N1 vibrasyon değerinin 0.7 MILS olduğu görülmüştür. Elde edilen veriler incelendiğinde fan blade dengeleme işleminin vibrasyonda %78,1'e kadar bir düşüşe neden olduğu görülmektedir. Bu da yapılan balans denge ağırlık vidalarının kullanımının vibrasyonu önemli ölçüde düşürdüğünü göstermiştir.

Elde edilen veriler incelendiğinde balans denge vidalarının kullanımından sonra yapılan yüksek takat motor testleri sonucunda 1 numaralı motorda vibrasyon değerlerinin azalması ile birlikte EGT değerlerinde %13,3 azalma elde edilirken yakıt akışında yaklaşık %13,6 azalma gözlemlenmiştir.

Daha sonra takılan balans denge ağırlık vidaları yeniden sökülerek eskileri takılmış ve bakım kartı gereği yüksek vibrasyon değerine sahip bu GE CF6 motorunun fan kanatçıkları sökölüp kontrollerden geçirilmiş olup tam set yağlama işlemi yapılarak rotor diskinde olan dizilimi bozulmadan doğru sıralama ile takılarak vibrasyon testi uygulanmıştır. Çalışmanın odak noktasından birisi olan doğru yağlama işlemi ve takım işleminin motordaki vibrasyon üzerinde etkisinin önemi gözlenmiştir.

Tam set yağlama işlemi ve takım işlemlerinde sonra ilgili GE CF6 motoru yeniden yüksek devirlerde teste tabi tutulmuş ve ilk başta N1 3.2 MILS olarak ölçülen vibrasyon değeri tam set yağlama işlemi sonunda N1 1.2 MILS olarak ölçülmüştür. Yapılan çalışmada elde edilen veriler incelendiğinde fan kanatçıkları yağlama işleminin vibrasyonda %62,5'e kadar bir düşüş görülmektedir.

Yapılan bu çalışmada elde edilen veriler incelendiğinde fan kanatçıkları yağlama işleminden sonra yapılan yüksek takat motor testleri sonucunda 1 numaralı motorda vibrasyon değerlerinin azalması ile birlikte EGT değerlerinde %5,2 azalma elde edilirken yakıt akışında yaklaşık %6,9 azalma gözlemlenmiştir.

Yapılan her iki işlemde motorda mevcut olan N1 3.2 MILS değerindeki vibrasyonu düşürmede etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca vibrasyonun düşmesiyle birlikte yakıt akışı ve EGT değerlerinde de azalma olduğu ortaya konmuştur. Son durumda elde edilen değerler hem üretici bakım dokümanında verilen limitlerin hem de bakım şirketinin organizasyon el kitabında limitlerin altında olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen veriler ışığında hem daha az adam/saat harcanması yönünden hem zaman kavramı yönünden hem de vibrasyondaki değişim ele alındığında balans denge ağırlık vidaları kullanılarak yapılan vibrasyon giderme işleminin daha etkili olduğu deneysel olarak kanıtlanmıştır. Tam set yağlama işlemi fan kanatçıklarının tamamen söküm takım işlemlerini de gerektirdiğinden daha çok zaman almakta, daha fazla adam/saat maliyeti çıkarmaktadır.

Bu çalışmanın temel hedefinde aynı vibrasyon değerinde olan bir GE CF6 motorunda fan kanatçık ağırlık denge vidaları kullanılarak ve yağlama işlemleri yapılarak vibrasyondaki değişimler gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen veriler, yapılan fan kanatçıklarında denge ağırlık vidaları kullanımı ve fan kanatçıkları yağlama işlemlerinin vibrasyon değerlerini düşürmede ne derece etkili olduğunu, harcanan adam/ saatin maliyetinin ve işlem sırasında harcanan zaman ile karşılaştırılarak, bakım kuruluşları için en etkili ve verimli yöntemin tespiti için bir yol gösterici olacağı öngörülmektedir.

6.2. Öneriler

Havacılık sektöründe zaman kavramı hem bakım şirketleri hem de operatörler için büyük önem arz etmektedir. Fan kanatçıkları balans dengeleme vidaları kullanımından sonra gereken yüksek takat motor çalıştırma testlerinde bazen istenilen vibrasyon değerleri elde edilememekte, bu sebeple yapılan işlemlerin tekrar edilmesi gerekmektedir. Bu durum hem fazladan yakıt sarfiyatına hem de zaman kaybına yol açmaktadır. Bunun önüne geçebilmek için bir simülasyon programı ile yeni denge vidaları takılarak elde edilecek yüksek takat motor çalıştırma simüle edilerek vibrasyon değerinin önceden tespiti sağlanabilir. Böylece hem yakıt sarfiyatından hem de zamandan kazanç sağlanabileceği öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

1. Gao, Y., Zhou, Y., & Sun, X. 2014. Engine vibration certification. **Procedia Engineering, 80**, 1-9.
2. Wollmann, T., Modler, N., Dannemann, M., Langkamp, A., Nitschke, S., & Filippatos, A. 2017. Design and testing of composite compressor blades with focus on the vibration behaviour. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 92**, 183-189.
3. Tüfekci, M. 2023. Performance evaluation analysis of Ti-6Al-4V foam fan blades in aircraft engines: A numerical study. **Composites Part C: Open Access, 12**, 100414.
4. Meng, J., Liao, L. F., Li, D., Cao, Y., Yang, L. Y., & Chen, Y. Y. 2015. Topology optimization method research on hollow wide-chord fan blade of a high-bypass turbofan engine. **Procedia Engineering, 99**, 1228-1233.
5. AMM 72-21-00-00 CONF11 Revizyon Tarihi: Ekim 01/2023 Erişim Tarihi: Kasım 2023
6. [fromm.pdf \(colorado.edu\)](#) Composite Fan Blades and Enclosures for Modern Commercial Turbo Fan Engines ASEN 5063 : Gas Turbine Engines
7. Depriest, J. 2000. Aircraft engine attachment and vibration control (No. 2000-01-1708). SAE Technical Paper.
8. <https://www.geaerospace.com/propulsion/commercial/cf6> Erişim Tarihi: Aralık 2023
9. AMM TASK 72-00-00-00 Revizyon Tarihi: Ekim 01/2023 Erişim Tarihi: Kasım 2023
10. Çolak, M. B. 2016. Uçak motorlarının uçuşa elverişliliğinin takibi için yeni bir yöntem önerisi (Master's thesis, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
11. <https://skybrary.aero/articles/exhaust-gas-temperature-egt> 2023 Erişim Tarihi: Kasım 2023
12. <https://aeroreport.de/en/good-to-know/how-does-a-turbofan-engine-work-the-structure-ofanengine#:~:text=The%20fan%20rotor%20is%20the,via%-20the-%20low%2Dpressure%20shaft>. Erişim Tarihi Aralık 2023
13. AMM 72-20-00-00 CONF11 Revizyon Tarihi: Ekim 01/2023 Erişim Tarihi: Kasım 2023

14. AMM 72-21-00-00 Conf11 Revizyon Tarihi: Ekim 01/2023 Erişim Tarihi: Kasım 2023
15. 3rd International Symposium on Aircraft Airworthiness, ISAA 2013 Engine vibration certification Gao yanleia, Zhou yanpeib, Sun xiaoningb, a*
a,bAeroengine Airworthiness Certification Center Preparatory Office, China Academy of Civil Aviation Science and Technology CAAC, ChaoYang District Xibahe Beili No.24A, Beijing, 100028, China
16. AMM TASK 71-00-00-750-803-A : Revizyon Tarihi: Ekim 01/2023 Erişim Tarihi: Kasım 2023
17. TSM 77-32-00-03 CONF 11 Revizyon Tarihi: Ekim 01/2023 Erişim Tarihi: Kasım 2023
18. Bowyer, E. P., & Krylov, V. V. 2014. Damping of flexural vibrations in turbofan blades using the acoustic black hole effect. **Applied Acoustics**, **76**, 359-365.
19. Amoo, L. M. 2013. On the design and structural analysis of jet engine fan blade structures. **Progress in Aerospace Sciences**, **60**, 1-11.
20. Depriest, J. 2000. *Aircraft engine attachment and vibration control* (No. 2000-01-1708). SAE Technical Paper.
21. Wollmann, T., Modler, N., Dannemann, M., Langkamp, A., Nitschke, S., & Filippatos, A. 2017. Design and testing of composite compressor blades with focus on the vibration behaviour. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **92**, 183-189.
22. Hong, Y., He, X. D., & Wang, R. G. 2012. Vibration and damping analysis of a composite blade. **Materials & Design**, **34**, 98-105.
23. Chen, Y., Tian, J., Ou-Yang, H., & Wang, A. 2019. Numerical investigation of rub-induced composite fan blade vibrations and abradable coating removals. **Composite Structures**, **226**, 111274.
24. Min, J. B., Duffy, K. P., Choi, B. B., Provenza, A. J., & Kray, N. 2013. Numerical modeling methodology and experimental study for piezoelectric vibration damping control of rotating composite fan blades. **Computers & Structures**, **128**, 230-242.
25. A330 GE CF6 Tecnicl Training Manual (Erişim Tarihi: 22.12.2023)
26. AMM 72-21-43-640-801-A Revizyon Tarihi: 01 OCT 2023 (Erişim Tarihi: 23.12.2023)

27. AMM 72-21-43-400-802-A Revizyon Tarihi: 01 OCT 2023 (Erişim Tarihi: 23.12.2023)
28. AMM 71-00-00-750-806-A Revizyon Tarihi: 01 OCT 2023 (Erişim Tarihi: 24.12.2023)
29. AMM 72-21-43-400-802-A Revizyon Tarihi: 01 OCT 2023 (Erişim Tarihi: 25.12.2023)
30. **<https://www.acesystems.com/fundamentals-series-aviation-vibration/>** (Erişim Tarihi: 01.01.2024)
31. AMM 72-21-43-400-802-A Revizyon Tarihi 01.01.2024 (Erişim Tarihi 04.01.2024)
32. AMM 71-00-00-750-811-A Revizyon Tarihi 01.01.2024(Erişim Tarihi 04.01.2024)

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Osman İlker AÇIKGÖZ

Uyruğu: Türkiye (T.C)

Doğum Tarihi ve Yeri:

Medeni Durum:

E-mail:

Yazışma Adresi:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Uçak Gövde Motor Bakımı	2024
Lisans	Anadolu Üniversitesi, Uçak Gövde Motor Bakımı	2013
Lise	Motor Meslek Lisesi, ADANA	2007

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2014-Halen	THY Teknik AŞ	Uçak Bakım Teknisyeni

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

Açıköz O.İ., Tangöz S., “Uçak Motorlarında Fan Blade Ağırlık Dengelenmesi Ve CF6 Motorlarında Uygulanması”, 7. Uluslararası Haliç Kongresi , Türkiye, 23-25, Ocak 2024.