

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK BASINÇLI UÇAK MOTORLARININ
FAN KANAT TİTREŞİMLERİNİN AZALTILMASI VE TESTLERİ**

OZAN KURAL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE TEORİSİ VE KONTROL PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. RAHİMİ GÜÇLÜ**

İSTANBUL, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK BASINÇLI UÇAK MOTORLARININ
FAN KANAT TİTREŞİMLERİNİN AZALTILMASI VE TESTLERİ

Ozan KURAL tarafından hazırlanan tez çalışması 17.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Makine Teorisi ve Kontrol Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Recep BURKAN
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa

Dr. Öğretim Üyesi Meral BAYRAKTAR
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu tezin olgunlaşmasında, ilerlemesinde ve yol haritamın çizilmesinde değerli katkıları olan hocam Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ'ye, tezi tamamlamamda her daim desteğini esirgemeyen Arş. Gör. Oğuzhan AHAN'a, yoğun çalışma dönemimde bana gösterdikleri sabır ve yardımları için inanılmaz bilgi kaynağı olan çalıştığım kurum ve arkadaşlarıma, son olarak da tezimin hazırlanması sırasında beni cesaretlendiren, büyük emekleri geçen, beni yetiştirip bu konuma ulaşmamı sağlayan, öğrenim hayatım boyunca her türlü fedakarlığı gösteren ve hayatım boyunca her zaman benden yardımlarını esirgemeyen aileme, eşimin ailesine, eşime, hayata küçük adımlar atmaya başlayıp, büyük mutluluklar getiren ikizlerimize ve tüm arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Temmuz, 2019

Ozan KURAL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	6
1.3 Hipotez	8
BÖLÜM 2	
UÇAK TİTREŞİMLERİ	10
2.1 Uçak Titreşimleri ve Kaynakları.....	10
2.1.1 Uçaklarda Yer Pozisyonunda Titreşim Kaynakları.....	11
2.1.2 Uçaklarda Uçuş Esnasında Titreşim Kaynakları	11
2.1.3 Uçak Motorlarında Ağır Bakım Sonrası Oluşan Titreşim Kaynakları.....	15
2.2 Uçuşa Elverişlilik Sertifikası	17
2.3 Titreşimlerin İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri	18
2.3.1 Vücut Frekans Ağırlık Eğrisi ve Referans Eksenİ.....	20
BÖLÜM 3	
UÇAK VE TURBOFAN UÇAK MOTORLARININ GENEL YAPISI	21
3.1 Uçakların Genel Yapısı	21

3.1.1 Geniş Gövdeli Bir Uçağın Teknik Özelliklerinin İncelenmesi.....	24
3.1.2 Dar Gövdeli Bir Uçağın Teknik Özelliklerinin İncelenmesi	25
3.2 Uçak Motorları	26
3.3 Uçak Motorlarının Genel Yapısı	27
3.4 Uçak Motorlarının Çalışma Prensibi	29
3.4.1 Fan Kanat Yapısı ve Motordaki Konumu.....	31
3.5 Uçak ve Motor Bakımında Karşılaşılan Hatalar.....	34
3.5.1 Uçak Motor Fan Kanadı Dengelemesi	35
3.6 Fan Kanatları Kaynaklı Titreşimler	39

BÖLÜM 4

UÇAK MOTOR FAN KANATLARI.....	40
4.1 Uçak Motorlarının Dinamik Davranışlarının Değerlendirilmesi	40
4.2 Titreşim Sönümleyici (Denge Vidaları) ile Kontrol	42

BÖLÜM 5

FAN KANAT TİTREŞİMİNİ AZALTMAYA YÖNELİK YAPILAN TESTLER.....	47
5.1 Motor Fan Kanatlarının Sökme ve Takma Adımları	47
5.2 Titreşim Veri Akışları ve Değerlendirme Süreci	48
5.2.1 Ana Kumanda Ekran Verileri (ECAM).....	49
5.2.1.1 N1 ve CRF Titreşim Sensörleri Çalışma Prensibi	51
5.2.1.2 N1 ve N2 Hız Sensörleri	52
5.2.1.3 Motor Ara Birim ve Titreşim İzleme Ünitesi (EIVMU)	53
5.2.1.4 Uzak Veri Dönüştürücü	53
5.2.2 Fan Kanat Dengelemesi ve Titreşim Seviyeleri	54
5.3 Titreşimin Azaltılmasına Yönelik Test İşlemleri	56
5.3.1 Fan Kanatları Sökme ve Toplama İşlemleri	57
5.3.1.1 Fan Kanat Çiftleri ve Montaj Şeması	58
5.4 Fan Kanat Titreşimlerinin Azaltılması ve Testleri.....	60

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR.....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	75

SİMGE LİSTESİ

Q	Akışkan debisi
A_1	Giriş kesit alanı
A_2	Çıkış kesit alanı
V_1	Giriş akışkan hızı
V_2	Çıkış akışkan hızı
P_1	Giriş akışkan basıncı
P_2	Çıkış akışkan basıncı
ρ	Akışkan özgül kütlesi

KISALTMA LİSTESİ

AGB	Dişli Kutusu (Accessory Gear Box)
AMM	Uçak Bakım El Kitabı (Aircraft Maintenance Manuel)
AOG	Yerdeki Uçağın Uçmasına Engel Durum (Aircraft On Ground)
CFMI	CFM Uçak Motor Üretim Şirketi (CFM International (CFM: Cubic Feet per Minute))
CRF	Kompresör Arka Çerçevesi (Compressor Rear Frame)
EASA	Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı (European Aviation Safety Agency)
ECU	Motor Kontrol Ünitesi (Engine Control Unit)
EIVMU	Motor Ara Birim ve Titreşim İzleme Ünitesi (Engine Interface and Vibration Monitoring Unit)
FAA	Federal Havacılık İdaresi (Federal Aviation Administration)
FARs	Federal Havacılık Yönetmelikleri (Federal Aviation Regulations)
FADEC	Ana Dijital Motor Kontrol (The Full Authority Digital Engine Control)
FOD	Yabancı Madde Hasarı (Foreign Object Damage)
IAE	Uluslararası Uçak Motorları Üreticisi (International Aero Engines)
IATA	Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (The International Air Transport Association)
LPT	Düşük Basıncı Türbin (Low Pressure Turbine)
LRU	Hat Değiştirilebilir Ünite (Line Replaceable Unit)
MCDU	Çok Amaçlı Kullanılan Bilgi Ekranı (Multifunction Control Display Unit)
MRO	Bakım Onarım Revizyon (Maintenance, Repair, Overhaul)
N1	Fan Kanatları
OEM	Orijinal Ekipman Üreticisi (Original Equipment Manufacturer)
QEC	Hızlı Motor Değişimi (Quick Engine Change)
RCC	Uzak Veri Dönüştürücü (Remote Charge Unit)
SHY	Sivil Havacılık Yönetmeliği
SHY-145	Onaylı Hava Aracı Bakım Kuruluşları Yönetmeliği
SHGM	Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü
VIB N1	Fan Kanatları Titreşim Değeri

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1. 1 Gaz türbinü çalışma prensibi ve bölümleri.....	2
Şekil 1. 2 Brayton Çevrimi	3
Şekil 2. 1 Park pozisyonunda bekleyen uçaklar.....	11
Şekil 2. 2 Uçak gövdesinin düşey yer değiştirmesi	12
Şekil 2. 3 Uçak teker koyma anı etki kuvvetleri.....	13
Şekil 2. 4 Yıldırımın uçağa bağlanma ve terk etme bölgeleri	14
Şekil 2. 5 Uçaklarda meydana gelen yıldırım hasarları.....	14
Şekil 2. 6 TC-JJL Seyrüsefer anı	15
Şekil 2. 7 SHY-145/EASA-145 Bakım Kuruluşu sınırlamaları/kuralları.....	16
Şekil 2. 8 İnsan vücudu için ağırlıklandırılmış frekans eğrileri.....	19
Şekil 2. 9 İnsan vücudunun maruz kaldığı titreşime göre rahatsızlık sınır eğrisi.....	19
Şekil 2. 10 İnsan vücudu için frekans eğrisi ve referans koordinat takımı	20
Şekil 3. 1 Bernoulli akışkan deneyi	21
Şekil 3. 2 Aerodinamik profil	22
Şekil 3. 3 Uçağa etki eden kuvvetler	23
Şekil 3. 4 Boeing 787 Dreamliner	24
Şekil 3. 5 Airbus A321neo	25
Şekil 3. 6 Farklı firmalar tarafından imal edilen motor bölümleri.....	27
Şekil 3. 7 V2500 motor parçalarını üreten firmalar	28
Şekil 3. 8 Turbofan uçak motoru bölümleri.....	29
Şekil 3. 9 Uçak motorları çalışma esnasında oluşan akışkan karakteristikleri	30
Şekil 3. 10 Paylon bölgesi	31
Şekil 3. 11 Karbonfiber fan kanat kalıbı.....	31
Şekil 3. 12 Uçak motoruna zarar verebilecek yabancı malzemeler	32
Şekil 3. 13 Fan kanatlarının motordaki konumu	33
Şekil 3. 14 Yeni nesil kompozit fan kanat yapısı.....	33
Şekil 3. 15 Bakım hatası veya yabancı bir parçanın etki ve zarar yolu	35
Şekil 3. 16 Uçak motorlarının genel yapısı, GE9X Ticari Uçak Motoru.....	36
Şekil 3. 17 Genx 1B	37
Şekil 3. 18 Fan kanat motor disk montaj noktası	38
Şekil 3. 19 GE90-115B Fan kanat simetrik montaj işlemleri.....	39
Şekil 4. 1 Ticari uçaklarda fan kanatlarının dönüş yönü.....	41
Şekil 4. 2 Fan disk ve fan kanatlarının bağlantı noktaları	41
Şekil 4. 3 Fan kanat ilk rezonans frekans (Hz), fan kanat dönüş hızı (rpm).....	42

Şekil 4. 4	Motor fan kanadı kaynaklı titreşim.....	42
Şekil 4. 5	Ticari bir uçak motorun arka montaj kısmının kuvvet ve frekans ölçümleri (Dengesiz)	43
Şekil 4. 6	Pasif titreşim sönümleyici	43
Şekil 4. 7	Ticari bir uçak motorun arka montaj kısmının kuvvet ve frekans ölçümleri (Dengeli)	44
Şekil 4. 8	Tek merkezden dönen fan kanatlarının dengesizlik durumu	44
Şekil 4. 9	Fan kanat mili üzerinde eksantriklik titreşim konumları	45
Şekil 4. 10	Dönen fan kanadının maruz kaldığı merkezkaç kuvvetleri	45
Şekil 4. 11	Dönen fan kanatlarının hızlanma ve yavaşlama verileri	46
Şekil 5. 1	Uçuş sonrası hangara alınan uçak ve motor pozisyonu	47
Şekil 5. 2	Fan kanatları sökme takma işlemleri öncesi markalama işlemleri	48
Şekil 5. 3	Saat pozisyonu	49
Şekil 5. 4	Titreşim kontrol sistemi, N1:Fan kanat, N2:Fan bıçakları.....	50
Şekil 5. 5	ECAM Motor titreşim değerleri ölçüm sayfası.....	51
Şekil 5. 6	Titreşim kontrol sistem şeması ve çalışma prensibi	52
Şekil 5. 7	N1 ve N2 sensörleri	53
Şekil 5. 8	RCC ve konumu	54
Şekil 5. 9	Fan kanatlarının genel montaj şeması	55
Şekil 5. 10	N1 Yatak ve sensör halkası.....	56
Şekil 5. 11	Motor test güvenlik mesafeleri.....	57
Şekil 5. 12	Fan kanatları sökülmüş olan disk, fan kanat yuvası.....	58
Şekil 5. 13	Fan disk üzerinde, fan kanat çiftlerinin konumları	59
Şekil 5. 14	Fan kanat disk veya platform üzerinde dizim sırası ve yeri	60
Şekil 5. 15	ECAM titreşim değerleri.....	60
Şekil 5. 16	Fan disk koruyucu aç haritası	64
Şekil 5. 17	Fan disk koruyucu denge ağırlık montaj haritası	65
Şekil 5. 18	N1 Denge ağırlık vida konumları	66
Şekil 5. 19	Fan disk üzerinde fan kanat yuvaları	66
Şekil 5. 20	N1 Denge ağırlık vida montaj hali	68
Şekil 5. 21	N1 Denge ağırlığı fabrika çıkış	69
Şekil 5. 22	Test işlemleri sonucu alınan ECAM değerleri	69
Şekil 5. 23	Test aşamaları	70

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1	Çeşitli motorlar için hafiflik değerleri..... 4
Çizelge 2.1	Motor tipleri ve maksimum itme değerleri..... 10
Çizelge 2.2	Boeing 777-300, TC-JJZ teknik özellikleri 12
Çizelge 2.3	THY Teknik A.Ş. Uçak kabiliyet listesi 17
Çizelge 2.4	THY TeknikA.Ş. Motor kabiliyet listesi..... 17
Çizelge 3.1	Knot hız çevrim tablosu 22
Çizelge 3.2	Bazı uçak tiplerinin yüklü ağırlıklarına göre kalkış hızları 23
Çizelge 3.3	Bazı uçak tiplerinin yüklü ağırlıklarına göre seyir hızları 24
Çizelge 3.4	Model 787-10 teknik özellikleri 25
Çizelge 3.5	Model A321neo teknik Özellikleri 26
Çizelge 3.6	Motor tiplerine göre fan kanat sayıları 38
Çizelge 5.1	ECAM ekran hesaplama verileri 61
Çizelge 5.2	Radyan dönüşüm bilgileri..... 62
Çizelge 5.3	MCDU tarafından gösterilen titreşim çözümleri 62
Çizelge 5.4	Denge vidası bilgileri 63
Çizelge 5.5	Uçak bakım kılavuzu tarafından verilen referans değerler 67
Çizelge 5.6	Birim dönüşümleri..... 67
Çizelge 5.7	İzin verilen maksimum mil hızları..... 68

YÜKSEK BASINÇLI UÇAK MOTORLARININ FAN KANAT TİTREŞİMLERİNİN AZALTILMASI VE TESTLERİ

Ozan KURAL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Rahmi GÜÇLÜ

İnsan ve kargo taşımacılığının önemi günümüzde sürekli artan bir ivme göstermektedir. Yaşadığımız çağ gereği, insan ve kargo taşımacılığının en hızlı yapıldığı sektör, havacılık sektörüdür. Talep edilen bu kapasitenin karşılanabilmesi için, uçuş güvenliği ve zaman yönetimi daha da önem kazanmıştır. Bu talebi karşılayan ve görevi yerine getiren makineler, ihtiyaca yönelik sipariş edilir, imalat hattına girmeden önce, detayları ve motor seçimleri yapılır. Deniz seviyesinden ortalama 11.000 m yükseklikte, 900 km/sa hızla uçan bu motorlar, uçak motoru olarak tanımlanmaktadır. Bu tez çalışmasının odak noktasında, uçaklara itki kuvvetini sağlayan bu uçak motorları olacaktır.

Uçak motorlarının; üretim kaynaklı yapısal hatalar, kuş ve yıldırım çarpması, yoğun sis, yağmur, kar, vb. yabancı maddelerin motora girmesi sebebi ile çalışan ve dönen aksamaların çalışır durumdaki dengelenmesi bozulabilmektedir. Bu durumun, kalıcı titreşimlere sebebiyet verdiği tespit edilmiştir. Tüm bu unsurlar dışında, yetkili bakım kuruluşuna rutin veya rutin olmayan sebeplerden dolayı, bakıma gelen uçak ve uçak motorlarının, bakım kaynaklı hatalar sebebi ile de titreşim değerlerinin limit dışına çıktığı tespit edilmiştir. Limit dışına çıkan her bir durum, konforu, insan sağlığını ve uçuş güvenliğini olumsuz yönde etkilemektedir.

Bakım esnasında ve bakım sonrası hataları sıfıra indirmek amacı ile, personelin söküm öncesi ve sonrası izlemesi gereken sıralı iş adımlarının önemi tespit edilmiştir. Uçak motoru parçalarının karmaşık yapısı, söküm ve montaj sonrası iş adımlarının daha da dikkatli yapılması gerekliliğini zorunlu kılmıştır.

Titreşim seviyesini istenilen değerlere azaltabilmek için; pasif, yarı aktif ve aktif kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Titreşim yutucuların en etkilisi aktif sistemlerdir. Daha sonra, yarı aktif ve pasif sistemler gelmektedir. Titreşim yutucu olarak hangi sistemin seçileceği, uygulanması hedeflenen alanın fiziki şartlarına da bağlı olabilmektedir. Özellikle, uçak sektöründe hafif ve basit çözüm yöntemleri tercih edilmektedir.

Bu alışmamızda yüksek basınçlı, turbo fan tip uçak motorlarının, fan kanat kaynaklı titreşimleri araştırılmıştır. Titreşim azaltıcı yöntem olarak, pasif yutucuların kullanılması hedeflenmiştir. Ayarlanmış kütleye sahip bu yutucuların, merkezkaç kuvveti sebebi meydana gelen dengesizilikleri ve titreşimleri, karşı denge kuvveti meydana getirerek azaltması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Uçak motoru titreşimleri, ayarlanmış titreşim yutucular, pasif kontrol, fan kanatları, pasif sönümleyici.

ABSTRACT

REDUCTION AND TESTING OF FAN BLADE VIBRATION OF HIGH PRESSURE AIRCRAFT ENGINES

Ozan KURAL

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof.Dr. Rahmi GÜÇLÜ

Today, the importance of human and cargo transportation shows an increasing momentum. Due to the era we live in, the fastest transportation of people and cargo is the aviation sector. In order to meet this demand, flight security and time management became even more important. Machines meeting this demand and performing the task are ordered according to the needs, details and engine selections are made before entering the production line. At an altitude of 11,000 m above sea level, these engines flying at a speed of 900 km/h are defined as aircraft engines. The focus of our study will be on these aircraft engines that provide thrust forces to aircraft.

The structural errors of aircraft engines, bird and lightning strikes, dense fog, rain, snow, foreign matter entering the engine due to the balance of the working and rotating parts can be deteriorated. This situation has been found to cause permanent vibrations. In addition to all these factors, it has been determined that the aircraft and aircraft engines that have been taken care of due to routine or non-routine maintenance to the authorized maintenance establishment have been excluded from the limit due to maintenance errors. Every situation that goes beyond the limit affects comfort, human health and flight safety negatively.

The importance of the sequential work steps that the personnel should follow before and after dismantling is determined in order to reduce the errors during and after maintenance. The complex structure of the aircraft engine components necessitated the need to carry out work steps more carefully after dismantling and assembly.

To reduce the vibration level to the desired values; passive, semi-active and active control systems are used. Vibration absorbers are the most effective active systems. Then, semi-active and passive systems come. Which system to be selected as a vibration absorber, depending on the physical conditions of the intended area to be applied. In particular, light and simple solution methods are preferred in the aircraft industry.

In this study, the fan sash vibration of high pressure, turbo fan type aircraft engines has been investigated. It is aimed to use passive dampers as a vibration reduction method. These absorbers with adjusted mass are aimed to determine the imbalances and angular position caused by the centrifugal force, to create a balance force against the imbalance and decrease the vibration.

Keywords: Aircraft engine vibrations, adjusted vibration absorbers, passive control, fan blade, passive damper.

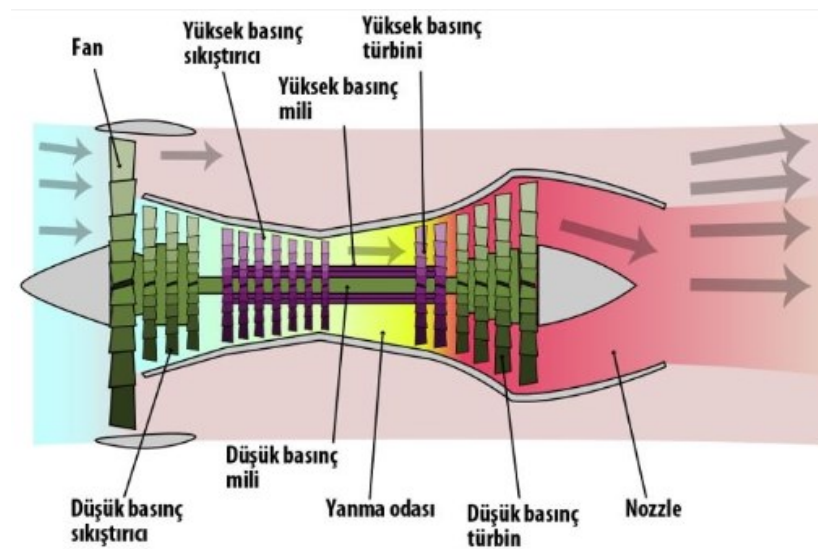
1.1 Literatür Özeti

Gaz türbinleri, fan kanatlarının havayı absorbe etmesi, kompresör yapısının havayı sıkıştırarak yanma odasına havayı iletmesi ile yakıt-hava karışımını sağlayan ve akışkanın türbinde genişlemesiyle iş elde eden makinelerdir. Dünya genelinde geniş bir pazar yelpazesine sahip olan gaz türbinleri, uluslararası arenada, hava taşımacılığı, savunma sanayi ve elektrik üretimi dahil değişik alanlarda faaliyet göstermektedir. Uçak sektöründeki önemini uçak ana yapısını üreten imalatçılar ile uçak motorlarını üreten imalatçıların tamamen ayrı fakat birbirinden ayıramayan sektörler olarak görmekteyiz [1].

Gelişmekte olan ülkeler statüsünde olan Türkiye'nin, uluslararası ticaret ve uçuş nokta sayısının artması, enerjiye olan gereksinimleri ve savunma sanayinin ilerlemesi ile gaz türbinleri, jet motorları ve helikopter motorları faal bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca, denizcilik sektöründe uzun menzilli gemi motorlarında, kara araçları ve taşımacılık sektöründe yeni nesil kamyonlarda, hızlı trenlerde, savunma sanayisinde ise tank motorlarında kullanılmaktadır. Güç üretim sektöründe de büyük bir paya sahip olan gaz türbinleri ciddi bir pazara sahiptir. Türkiye'nin bu pazara katılmak için yaptığı çalışmalar olmasına rağmen böylesine bir ciddi sektörde Türkiye'nin bugüne kadar bulunmaması milli ekonomi açısından oldukça büyük paraların yurt dışına çıkmasına ve cari açığın artmasına neden olmaktadır.

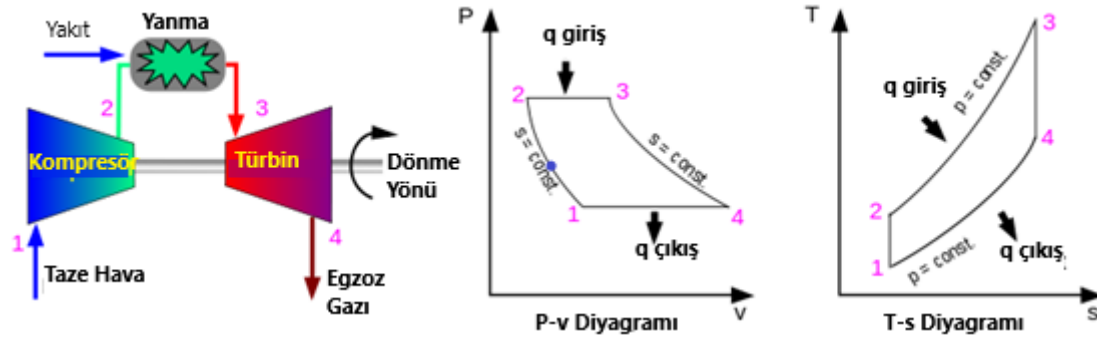
Gaz türbinlerinde gelen akışkanın genişleyerek güç elde edilmesini sağlayan türbinlerin birçok çeşidi bulunmaktadır. Havacılık, taşımacılık, güç üretim santralleri ve savunma

sanayisinde en geniş uygulama alanına sahip olan türbin türü eksenel türbinlerdir. Eksenel türbin aerodinamiği ve tasarımı üzerine birçok araştırma bulunmakta ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir [1].



Türbin teknolojisinin birinci derecede hedefi maksimum oranda enerjiyi akışkan üzerinden çekerek, kullanılabilir mekanik enerjiye dönüştürmektir. Gaz türbini emdiği havayı kompresör bölümünde sıkıştırarak yanma odasına iletir, yanma sonucunda açığa çıkan yüksek enerji ile sıkışmış gazın entalpisi arttırılır. Türbine doğru yanmış gazlar genişletirilir ve hızları arttırılır. Yüksek hıza ulaşan yanmış gazlar devinimleri sayesinde türbin pallerine çarparak dödürme kuvveti oluşturur ve bu dödürme kuvveti kompresör modülünü bir shaft vasıtasıyla çevirmek için kullanılır. Türbinden çıkan yanmış gazlar ise

lüle boyunca daha da hızlandırılarak ihtiyaç duyulan itki kuvveti elde edilir. Bu çalışma prensibine, Brayton çevrimi denilmektedir (Şekil 1.2) [2].



Şekil 1.2 Brayton çevrimi [3]

Amacı itki üretmekten daha çok enerji üretmek olan gaz türbinlerinde, ikincil bir şaft türbin ile bir alternatör arasında bağlantı sağlayarak, elektrik üretmek için ihtiyaç duyulan gücü şaftın torku ve dönme hızı ile alternatöre iletir. Bazı uygulamalarda ise, gaz türbinleri sadece kompresör işlevi görmektedir. Örneğin, petrol çıkartma platformlarında yerin altına su basmak için de kullanılmaktadırlar.

Günümüz havacılık sektöründe gaz türbini uygulamaları turbojet, turbofan, turboprop ve turboşaft adları altında görülmektedir. Bu sınıflandırma gaz türbinin kullanılacağı platform isterlerine göre gaz türbini üzerinde değişiklikler yapılmasından kaynaklanmaktadır. Ancak genel çalışma prensibi tüm uygulamalarda benzerdir [2].

Jet motorları basit bir anlatımla, ön taraftan fan ile içeri alınan havanın yakıt ile karıştırılıp patlatılarak arkadan çıkarılıp itiş kuvveti elde edilmesiyle çalışır. İçeride sıkıştırılan hava aniden dışarı çıkmak ister ve motorun arka kısmında çok büyük bir itme kuvveti oluşturur. Etki-Tepki Prensibini göz önüne aldığımızda itilmek istenilen hava bu kuvvete tepki gösterecek ve motorun ileriye doğru hareket etmesini sağlayacaktır. Önden alınan hava çok büyük bir vakum oluşturmaz, yani motor fanının büyüklüğü ve devri ölçüsünde havayı motor içerisine alır. Fakat, motor içerisinde meydana gelen patlamayla birlikte arkaya verilen hava itiş çok fazladır [3].

Uçaklarda kullanılan motorların iki ana görevi vardır. Bunlardan ilki, kalkış yapan uçağın yer sürüklenmesini yenilerek uçağın ivmelendirilmesidir. İkinci ana görevi ise, uçağın öngörüldüğü hızlarda uçuşu esnasında meydana gelen sürüklenme kuvvetine eşit bir çekme kuvveti (veya tepki kuvveti) sağlamasıdır.

Genel olarak uçak motorlarından hafif ve güçlü olmaları beklenir. Bunun başlıca nedeni yerçekimi kuvvetini yenmek için kullanılacak tepki kuvvetini azaltmak olarak söylenebilir. Uçak motorlarında hafiflik teriminin birimi; pervaneli güç gruplarında beygircü başına kuru motor ağırlığı (Kg/Hp), jet motorlarında statik tepki kuvveti başına kuru motor ağırlığıdır. Çeşitli motorlar için hafiflik değerleri (Çizelge 1.1).

Çizelge 1.1 Çeşitli motorlar için hafiflik değerleri [4]

Motor Çeşidi	Değer	Birim
Pistonlu Motorlar	0.50 – 0.30	Kg/Hp
Turboprop Motorlar	0.15 – 0.25	Kg/Kg
Turbojet Motorlar	0.25 – 0.35	Kg/Kg
Turbofan Motorlar	0.17 – 0.25	Kg/Kg

Eğer motorların belirtilen ağırlık özelliklerine dayanılarak bir karşılaştırma yapılmaya çalıştırılırsa hafiflik yönünden avantajları ve dezavantajları tam olarak ortaya çıkmayacaktır. Yukarıda verilen değerlere göre yapılan karşılaştırmada pistonlu motorlu uçakların diğerlerine nazaran dezavantajlı oldukları, öte yandan Turbojet ile Turbofan motorları arasında çok büyük bir fark olmadığı görülmektedir [4].

Sabit kanatlı uçakların titreşim ve iç kabin gürültü seviyelerini kontrol etmek, bir zorunluluktur. Titreşimin temel sebeplerinin sabit kanatlı uçaklarda, uçak motorlarının direkt etkisi olduğu çalışmalarda sunulmuştur. Çalışmalarında modern uçaklarda ki motor titreşim ve gürültü problemlerinde kullanılabilecek çözümleri sunmaktadır. Ek olarak, programın tasarım ve uçuş test aşamalarında uçağa OEM'e teknoloji destekleri sunan bir tasarım yaklaşımının ana hatları çizilmiştir [5].

Tüm montaj sistemlerinin iki temel görevi yerine getirmesi beklenir;

1.Hareketi sınırlandırma

2.Titreşim yalıtımı ve gürültüyü azaltma

Hareketi sınırlandırma; İtke, yük, ağırlık ve tork tarafından oluşturulan iki yapı arasındaki bağıl hareketi sınırlandırma anlamına gelir. İzolasyon sağlama ve gürültüyü azaltma ise iletilen gürültüyü kabin alanında azaltmak için, titreşimin bir yapıdan diğerine aktarılmasını en aza indirmeyi içerir. İlk temel işlevin sağlanabilmesi için, montaj işlemlerinin sıkı geçme tolerans aralıklarının minimum olması gerekir. İletilen titreşimi en aza indirmek için, montaj işlemi dinamik ve merkezlenerek yapılmalıdır. Bu problem, motor parçalarının tasarımında, uyum ve esneklik gerektiren rekabetçi hedefleri belirler. Bu temel sorun, daha uzun ömre ve daha düşük maliyete duyulan ihtiyaçla birlikte, yeni teknolojilerin gelişiminin de nedenidir [5].

Bir uçak motoru kurulumu ve uçağa montajı tamamlandıktan sonra, dönen aksamlardaki bir dengesizlik, yapıya uygulanan bir salımın kuvveti yaratır. Bu salımın sonucu olarak yapısal titreşimler meydana gelir. Motorların dönen parçalarının dengesizlikleri, gövdenin yapısal titreşimleri ile kendini gösterir.

Motor ve uçak motoru arayüzünde, titreşimin uçak gövdesine iletileceği birkaç yol vardır. Bu yollar; Montaj yapı noktaları ve titreşim sönümleme için kullanılan parçalardır [5].

Titreşim ve gürültü indirgeme uygulamaları pasif ve aktif olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Pasif indirgeme yolları, esnek malzemeler (kauçuk veya atek örgü), kompozit yapı bağlantıları, ayarlanmış titreşim emiciler, kabin duvarları ve iç işlemleri içermektedir. Kontrolör elektriği ve elektroniği gerektiren aktif sistemler üç ana tipten oluşmaktadır. Aktif izolasyon kontrolü, aktif gürültü kontrolü, aktif yapısal kontrol. Ayrıca bu sistemler hibrit bir şekilde de kullanılabilir.

Titreşim ve gürültü önleme sistemleri, uygulamada nasıl uygulandıklarına bağlı olarak üç kategoriye bağlı olarak incelemiştir [5].

- Titreşim izolasyon sistemleri direkt birincil yük, titreşim iletim yoluna yerleştirilmiştir.

- Yapısal kontrol sistemleri, yapıyı tedavi eden, ana yapıya direkt dahil olmayan sonradan dahil edilen yapılar, parçalar.
- Titreşimi ve gürültü kontrolünü direkt kaynağında indirgemeyen, yapı olarak yolculara yakın olan kabin alanındaki gürültüyü aktif olarak iptal eden özel bir aktif sistemler.

Titreşim izolasyonlarını belirtilen maddeler çerçevesinde incelemiştir. Bu maddeler; Ana yapı ile motor arasındaki katı bağlantı elemanları, ensek malzemeler (kauçuk veya hibrit ürünler), Fluidlastic™ titreşim izolatörü, aktif izolasyon kontrolü, aktif sıvı izolatörlerini olarak ifade edilmiştir. Titreşim izolatörlerini yapısal olarakda incelemiştir. Ayarlanmış titreşim emiciler ve aktif yapısal kontrol elemanları çalışmanın odak noktası olmuştur. [5].

Titreşim emiciler hakkında yapılan çalışmalarda, titreşim ve gürültü seviyelerinin, pasif elastomerik düzeneklerden aktif titreşim kontrol sistemleri için performans ve maliyet analizleri yapılmıştır. Motor montaj ve izolasyon işlemi, motoru uçağa sabitlemenin yanında, yapıdaki dinamik kuvvetleri azaltacak, uçak kabinindeki titreşimi ve sesi azaltacaktır. Uçak motorunun ve bileşenlerinin tasarımıyla ilgili birimlerin, birbirleri ile çözüm odaklı iletişim kurmaları, titreşim izolasyonunda hangi sistemin kullanılacağına karar verilmesini, sistem tasarımına en iyi yaklaşımı ve uçuş güvenliğini etkilemeyecek şekilde teknoloji seçiminde esnekliği sağlayacaktır. Tüm titreşim etkenlerini sönmüleyebilecek, ortak bir çözüm yöntemi ve bağlantı yapısı oldukça önemlidir [5].

1.2 Tezin Amacı

Askeri ve ticari uçaklar, tasarım ve imalat aşamalarında farklı unsurların ve alt montajlarının bir dizi karmaşık birleşiminden oluşmaktadır. Uçak çalışma süresi boyunca (Uçak motorlarının çalışması ile başlar) iniş, kalkış, uçuş irtifa seviyesine tırmanma, uçuş ve taksi yapma gibi değişik manevralara tabi tutulur. Bu aşamaların hepsinde, uçak motorları faal olarak çalışmaktadır. Bu durum yolcu güvenliği ve uçuş güvenliği açısından en kritik maddelerden birisidir. Uçak motorları havada faal olduğu kadar zemin manevralarında ve test işlemlerinde faal olarak kullanılmaktadır. Uçak motorları belirli bir uçuş saatini tamamladıktan sona yetkili bakım kuruluşları

tarafından, bakıma girmesi gerekmektedir, zorunludur. Bakımın temel amacı uçuş güvenliğini sağlamak, motorun ömrünü ve performansını arttırmaktır. Yenilenen teknolojiler ve bakım maliyetlerinin azaltılmasına yönelik rekabetçi hedefler doğrultusunda, karşılaşılan yapısal veya işlevsel sorunlara karşı daha basit ve hızlı çözümler üretme hedefleri daha da hız kazanmaktadır. Uçuş güvenliği ve rekabet şartlarının gereklilikleri doğrultusunda, imalatçı firmalar, teknolojinin ilerlemesi ile uçak sahipleri, uçak işleten operatörler, uçak bakım kuruluşları; (MRO: Maintenance, Repair, Overhaul), uçan motorlarının en kısa sürede yerde kalmalarını talep etmektedirler. Emniyet ve konfordan taviz vermeyecek şekilde çözüm odaklı çalışma yapmaları her geçen gün zorunlu hale gelmiştir.

Uçak motorlarında titreşim kaynakları öncelikli olarak dönen aksamlar sebebi ile meydana gelmektedir. Fabrika çıkışı tam olarak merkezlenen bu komponentler bazı dış etkilere sebebi ile merkez kaçıklığına uğramaktadır. Bu etkenler; hava koşulları, kuş ve yabancı madde çarpmaları (FOD, Foreign Object Damage) vb. sebepleri ile bakım kuruluşlarına rutin kontrole gelen uçak motorları gerekli kontrol işlemlerine tabi tutulmaktadır. Rutin ve rutin olmayan bakımlar sonrası uçak motorları belirli testlere tabi tutulmaktadır. Bu testlerin yapılması, uçuş emniyeti için birinci derecede önemli olup, uçak bakım el kitabı, Aircraft Maintenance Manuel (AMM)'nin bir gerekliliğidir. Test işlemleri, bu manullerde şart koşulmaktadır. Uçuş emniyetini tehlikeye sokabilecek tüm unsurlar limit içi seviyesine indirilmeleri en önemli hedeflerdendir. Uçağın bakım kuruluşunda, bakım ve/veya parça değişimi sebebi ile oluşabilecek titreşimleri ve limit dışı durumları, uçak içi ve/veya harici ekipmanlar kullanılarak ölçülmesi ve test edilmesi gerekmektedir. Özellikle, uçak motor bakımlarında, fan kanat değişimlerinde uçak tam gaz ile çalıştırılarak test edilir ve değerler, uçak içi ve/veya harici ekipman ile ölçülür. Uçak motor referanslarına göre inceleme yapılarak, çözümler değerlendirilir.

Uçak motorlarında titreşimi minimize etmek için balans ekipmanları kullanılır. Daha önceden değerleri belirlenmiş olan bu denge ağırlıkları ana yapıya montaj yapılarak, titreşimi oluşturan merkezkaç kuvvetine karşı bir denge unsuru olarak değerlendirilmekte ve titreşimi absorbe etmektedir. Titreşim kontrol sistemleri pasif, yarı aktif ve aktif olmak üzere üç ana çerçeve ile belirtilmektedir. Pasif kontrol

sistemleri bu yöntemlerden en basit ve maliyeti düşük olan yöntem olup, motor fan kanat yapısında kullanılabilecek en uygun yöntemdir. Pasif sistemler yay ve sönüm elemanından oluşması sebebi ile dışardan bir etkiye açık değildir.

İlgili maddeler gereği bu çalışmada enerji sarfiyatının az olması, hareketli sisteme uygunluk derecesi, fan kanat çalışma mantığına ve fiziki şartlara en uygun sistem olması ve yarı aktif ve aktif sistem gerekliliklerine göre kriterleri maksimum oranda sağlayan ve sönümleme işlemini yerine getirmesi sebebi ile pasif sistem tercih edilmiştir.

Çalışmanın temel amacı aşağıda belirtilen maddeler ile izah edilmiştir:

- Pasif sönümleyici yardımı ile fan kanat titreşimlerinin limitler dahiline indirgenmesi, uçuş güvenliğinin ve ergonomik yapının korunması
- Pasif kontrol için balans ağırlıklarının kullanılması
- Sonuçların uçak bilgisayar sistemlerinden çıkan grafik verileri ile değerlendirilmesi

1.3 Hipotez

Uçak motorları bakım kuruluşunda gerekli bakım ve komponent değişim işlemleri yapıldıktan sonra teste tabi tutulurlar. Bu aksaklıklar uçak motoru tam gaz çalışma ile test edildiği esnada veya adım adım gaz arttırma işlemi esnasında titreşim şeklinde görülür. Bu titreşim istenilmeyen bir durumdur, uçuş güvenliğini ve uçuş konforunu olumsuz olarak etkiler.

Uçak motorların da çalışma esnasında, değişik sebeplerden dolayı oluşan fan kanat titreşimlerin (pervane bıçakları) izolasyonu, ayarlanmış kütlelerin tam olarak hangi bölgeye konulacağını tespit ettikten sonra ana yapıya monte edilerek sağlanabilir. İzolasyonun sağlanması yolcu konforu ve uçuş emniyeti için önem arz etmektedir. Turbofan uçak motorlarında, uçak motor pervanelerinde, fan kanat kaynaklı titreşimlerin izolasyonu için kullanılabilecek sistemler vardır. Titreşim izolasyon veya kontrol sistemleri üç çeşittir. İlgili sistemler, pasif kontrol sistemleri, yarı aktif kontrol sistemleri ve aktif kontrol sistemleridir. Basit yapısı ve maliyet anlamında en uygun olması pasif sistemlerin kullanılmasını yaygın kılmıştır. Yarı aktif ve aktif sistemlerin

uçak motorlarında, fan kanat aksamalarında kullanımı teknik gerekçeler ve fiziki şartlar sebebi ile kısıtlıdır ve milisaniyeler mertebesinde cevap verebilecek bir sistemin maliyet, tasarım ve dizayn engelleri vardır. İlgili titreşim izolasyon sistemlerinin nerede ve ne amaçla kullanılacağı çok önem arz etmektedir. En önemli parametrelerden bir tanesi de uzun, durmaksızın yapılan uçuşlarda sistemin arıza vermeden güvenli bir şekilde işlevini yerine getirmesidir. Ayrıca kullanılacak sistemin uçak motoruna ve uaa ilave yük getirmemesi, azami derecede az yük getirmesi beklenir. Pasif kontrol sistemlerinin, fan kanatlarında kullanılan ve bu çalışmada tercih edilecek olmasının sebebi, enerji tüketimi de minumum hatta sıfır olması tercihe daha da açık olmasını sağlamıştır.

Sönüm kuvveti ana yapı ile beraber hareket etmesi ve ona karşı bir merkez kaç kuvveti uygulaması sebebi ile ilave bir kontrol sistemine ihtiyaç duymamaktadır. Titreşimlerin indirgenmesi ve sönümlenmesi açısından limit içi sonuçlar elde edilebilir. İlave olarak denge ağırlıklarının, sönümleyicilerin ana yapı ile birlikte doğru konumlanması, ana yapı ile beraber yer değiştirmesi, aynı yörünge doğrultusunda merkez kaç kuvvetlerinin alınan bilgisayar verileri doğrultusunda, sönümleyicilerin aynı hızda hareket etmesi ile ana yapıda oluşan titreşimlerin kontrolünü limit içine getirebilir. Bu kontrol yöntemi ile başarı parametreleri attırılabilir.

BÖLÜM 2

UÇAK TİTREŞİMLERİ

2.1 Uçak Titreşimleri ve Kaynakları

Uçaklar kalkış ve tırmanma esnasında maksimum itici güce ihtiyaç duyar, bu itici gücü ticari uçaklara sağlayan turbofan tip uçak motorlarıdır (Çizelge 2.1). Uçak motorlarında öncelikli olarak beklenen; güvenilirlik, hafiflik, ekonomik olması, yakıt sarfiyatı, bakım maliyeti, gürültü ve titreşim parametreleri gelmektedir.

Çizelge 2.1 Motor tipleri ve maksimum İtme değerleri [6]

Uçak Motoru	Maksimum Kalkış İtme Değeri
CFM56-5B3	33.000 lbf
LEAP-1A	35.000 lbf
LEAP-1B	28.000 lbf
Genx	66.500-76,100 (lbf) / 296-338 (kN)
GE90-115B	115.300 (lbf) / 512 (kN)
CF6-80E1A3	60.400 (lbf) / 268,683 (kN)

Uçak imalatçı firma tarafından her aşaması kontrollerden geçen uçak en son olarak, müşteri firma tarafından gönderilen uzman ekipler tarafından incelenir ve test uçuşuna tabii tutulur. Test uçuşu esnasında güvenlik, performans kriterlerine ilave olarak sözleşme maddelerinde opsiyon olarak belirtilen, koltuk dizilimi, koltuk deseni, koridor parametreleri, halı, vb. alt başlıklarda incelenir.

Uçaklarda meydana gelen titreşimleri iki ana başlık altında inceleyebiliriz.

2.1.1 Uçaklarda Yer Pozisyonunda Titreşim Kaynakları

Uçaklar uçuş hayatına başladıktan sonra, yer pozisyonlarını havalimanlarında alırlar (Şekil 2.1). Yolcu indirme ve bindirme işlemleri, bakım işlemleri her daim havalimanı (hava sahası) alanlarında yapılmaktadır. Bu esnada uçakların titreşime sebebiyet olan kaynakları aşağıda belirtilen maddeler şeklinde sıralayabiliriz. Çalışmamızdaki hedef birinci derecede uçuş güvenliği, ikinci derecede yolcu konforu olması sebebi ile veriler bu maddelere göre değerlendirilmiştir.

Uçak yer pozisyonunda iken, sabit pozisyonunu bozan, titreşime sebebiyet veren etmenler;

- Rüzgar
- Kargo yükleme ve indirme işlemleri
- İkram yükleme ve indirme işlemleri
- Yolcu iniş ve binış işlemleri

Yukarıda belirtilen etmenler yolcu konforunu bozan unsurlar olmaması sebebi ile çalışmamız kapsamına dahil edilmemiştir.



Şekil 2.1 Park pozisyonunda bekleyen uçaklar

2.1.2 Uçaklarda Uçuş Esnasında Titreşim Kaynakları

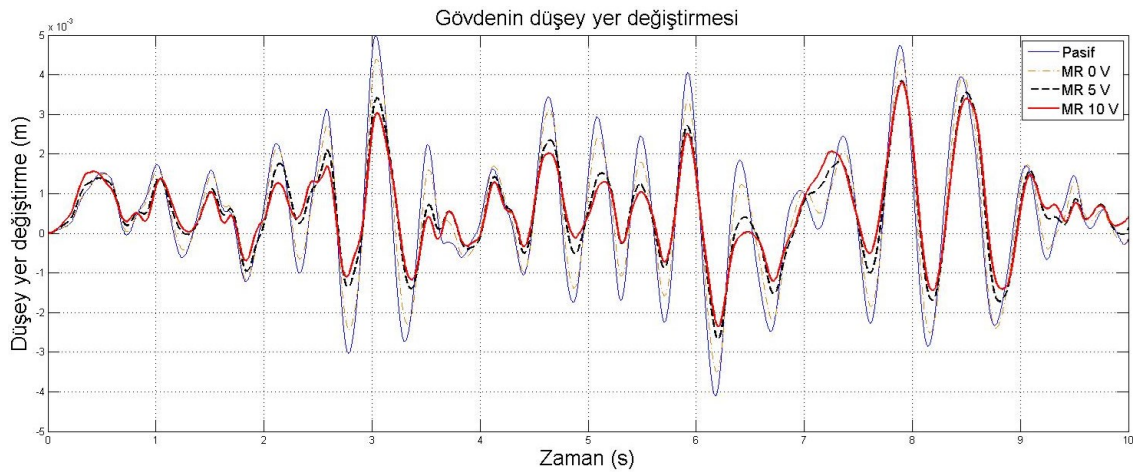
Uçaklarda kaptan pilot, kapı kapanma onayını verdikten sonra uçuş süreci başlamaktadır. Bu durum öncesi motorların çalışır durumda olması ve gerekli uçuş

hazırlılarının tamamlanmış olması gerekmektedir. Gerekli rutin teknik ve güvenlik kontrollerin yapılması mutlaka gereklidir ve her zaman istinasız yapılmaktadır. Uçaklar hedef havalimanına yaklaştıktan sonra iniş geçerler.

Çizelge 2.2 Boeing 777-300, TC-JJZ teknik özellikleri [7]

Menzil nm (km)	7,370 nmi (13649 km)
Uzunluk	73.9 m (242 ft 7 in)
Kanat Genişliği	64.8 m (212 ft 7 in)
Yükseklik	18.5 m (60 ft 8 in)
Motor	GE90-115BL

Uçakların taksi pozisyonunda meydana gelen titreşimleri, Balta ve Güçlü tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada, yarı aktif MR sönümleyicili uçak iniş takımı modelinin taksi pozisyonunda sefer hızı 55 km/h kabul edilerek modelleme yapılmıştır. Kurulan modele güzergah kriterleri olarak ISO 2631 standardına uygun C sınıfı rasgele yol değeri bozucu giriş olarak uygulanmıştır. Uçak ön ve arka iniş takımları arasında dt zaman gecikmesi ($dt=a+b/V$), arka sol ve sağ iniş takımları arasında ise 0.5 s'lik zaman gecikmesi kabul edilerek sistemin hareketleri (Şekil 2.3), MR sönümleyicili ve bulanık mantıklı kontrol uygulamasında karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir [8].



Şekil 2. 2 Uçak gövdesinin düşey yer değıştirmesi [8]

Yapılan bu çalışmada, taksi anında oluşan titreşimlerin konforu etkiler durumunda olduğu tespit edilmiştir [8]. İniş anında en fazla titreşimlerin hissedildiği durumdur (Şekil 2.3).

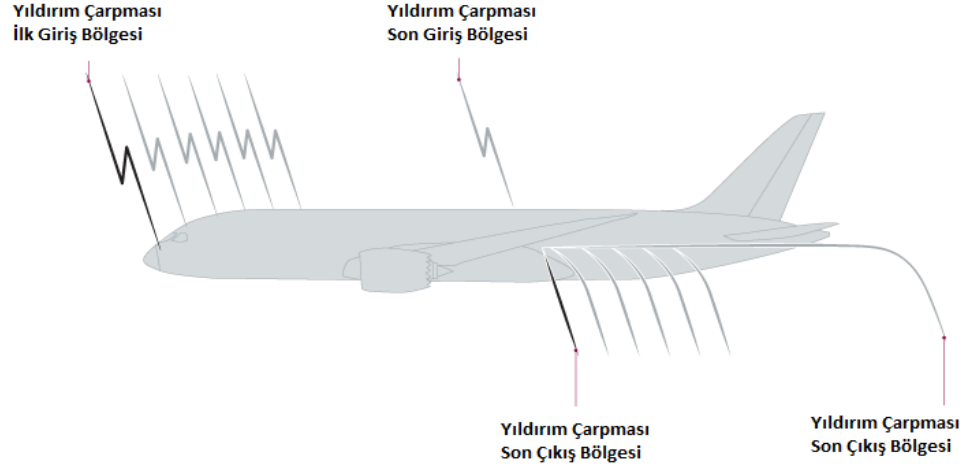


Şekil 2.3 Uçak tekerlek koyma anı etki kuvvetleri

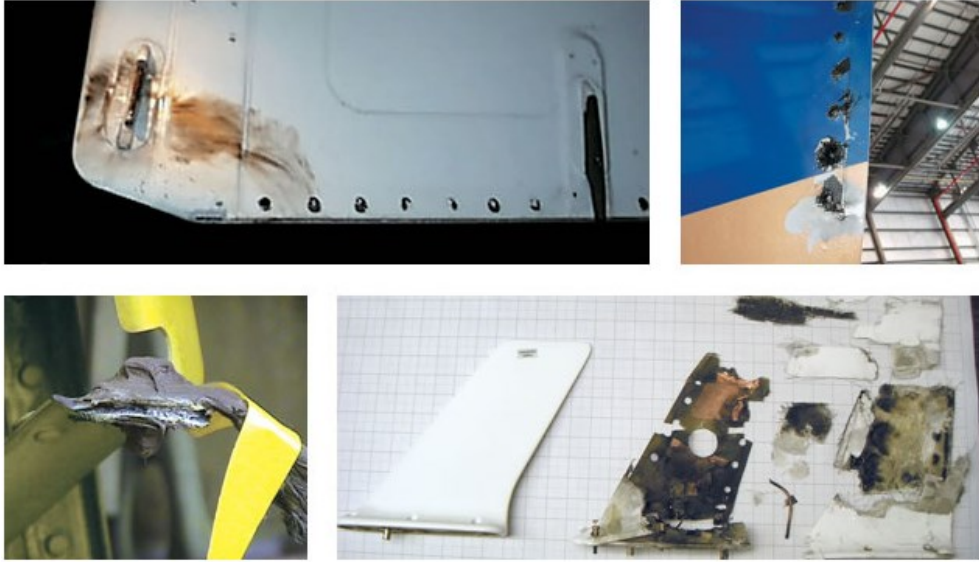
Uçak uçuş sürecine taksi (tekerlekleri üzerinde hareket) dahil başladıktan sonra sabit pozisyonunu bozan titreşime sebebiyet veren etmenler aşağıda sıralanmıştır:

- Rüzgar
- Motor titreşimleri
- Pist kaynaklı zemin bozuklukları (kalkış ve iniş durumu)
- Kalkış ve iniş esnasında tekerlerin infilak etmesi
- Motor fan kanatlarına kuş veya yabancı bir katı maddenin girmesi, çarpması
- Seyrüsefer esnasında hava akımı kaynaklı türbülans
- Yıldırım çarpması

Uçakta meydana gelen yıldırım hasarları (Şekil 2.4), uçağın fiziksel ve aerodinamik yapısını bozması sebebi ile uçuş esnasında aşırı titreşimlere sebebiyet vermektedir. Bu durum gerek uçuş konforunu gerekse uçuş emniyetini tehlikeye atacak boyuta ulaşabilmektedir (Şekil 2.5).



Şekil 2.4 Yıldırımın uçağa bağlanma ve terk etme bölgeleri [9]



Şekil 2.5 Uçaklarda meydana gelen yıldırım hasarları [9]



Şekil 2.6 TC-JJL seyrüsefer anı

2.1.3 Uçak Motorlarında Ağır Bakım Sonrası Oluşan Titreşim Kaynakları

Uçak motorlarının marka, model ve özelliklerine göre üretici firması tarafından belirli periyotlar ile bakıma alınması tavsiye edilir ve zorunludur. Bakıma alınan hava aracı için önemli olan ölçüm kriteri uçuş saati olarak takip edilmektedir. Bu durum uçak motorları için de geçerlidir. Uçaklar için diğer bir ölçüm kriteri ise uçağın bir kalkış ve inişi (cycle, bacak) olarak nitelendirilmektedir. Bu şekilde, geniş gövde olarak tabir edilen uçakların, daha uzun mesafe uçması operatör (uçak işletmecisi) firmalar tarafından tercih edilerek planlaması yapılmaktadır.

Yetkili uçak bakım kuruluşları (MRO: Maintenance, Repair, Overhaul), yetki kabiliyetleri (sınırları) dahilinde bakım işlemlerini yapmaktadırlar. THY Teknik A.Ş. uçak yetki kabiliyet listesi ve motor yetki kabiliyet listesi (Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4)'de görülmektedir.

Uçak ve motor bakım kuruluşlarının bakım sonrası uçuş güvenliğine ve bakım maneline uygun hareket edebilmesi için gerekli kriterler mevcut olup bunları sağlamakla yükümlüdür.

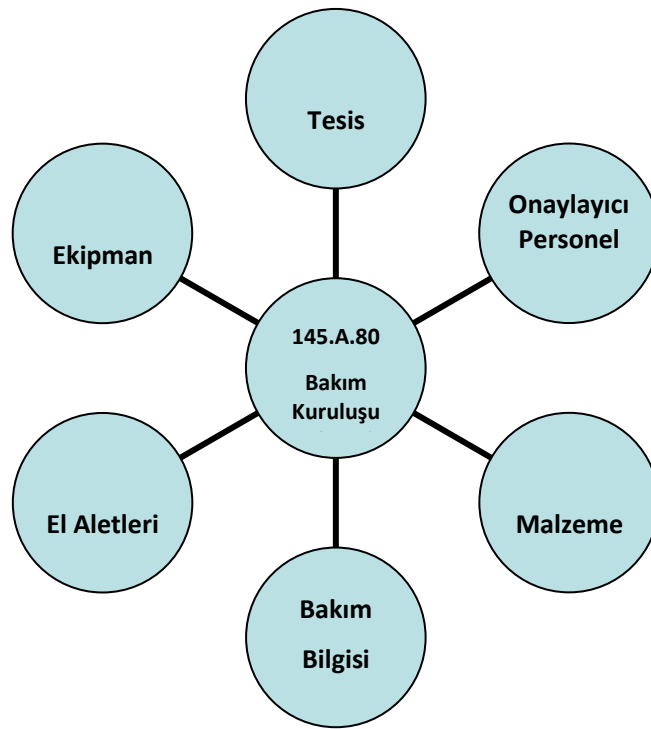
Yerel hava sahası ve uluslararası hava sahasında gerekli ve yeterli şartları sağlayamayan kuruluşlar kesinlikle bakım yapamazlar, yapmaları durumunda bakıma giren uçak veya motor ilgili hava sahalarında uçamaz.

Türkiye Cumhuriyeti ve Avrupa Birliği Ülke Hava Sahası'nda bir kuruluşun baktığı uçakların uçabilmesi için aşağıda belirtilen kurallar gereği, ilgili maddeleri eksiksiz

sağlaması gerekmektedir. Genel olarak SHGM onaylı hava aracı olarak nitelediği tüm araçların bakımlarının (SHY-145 / EASA-145 Bakım Kuruluşu Sınırlamaları/Kuralları) kurallarına göre yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Buna uymayan, uymadığını tespit ettiği kuruluşları, düzenli denetlemeler ile belirler ve yetkilerini askıya alır [10].

Bakım kuruluşları genel anlamda (Şekil 2.7)'de belirtilen maddeleri tam olarak yerine getirmelidir. Bu maddelerin tam olmaması, bakımların temiz bir şekilde yapılamamasına sebep olur. Bu durum hataların oluşmasına ve bakımı yapılan makinelerde verim düşüklüğüne sebep olur. Bakım kuruluşu için en önemli kaynak adam/saat olması sebebi ile bir işin, bir işlemin tekrar yapılması maliyet anlamında ilgili bakım kuruluşuna külfet getirmektedir.

Bu durumlara uçak motorlarının bakımında da karşılaşılmakta, tamir bakım işlemlerinin tekrarına, fan kanatları dönen aksamalarda beklenmedik titreşimler meydana gelmesine sebebiyet vermektedir. Bu da işlemlerin tekrar gözden geçirilmesi anlamına gelmektedir. Günümüz rekabet ortamında, zamanın ve personelin çalışma saatinin önemini de düşündüğümüz bir işlemin tek seferde ve nizami yapılması kritik önem arz etmektedir.



Şekil 2.7 SHY-145 / EASA-145 Bakım kuruluşu sınırlamaları/kuralları [10]

Çizelge 2.3 THY Teknik A.Ş. Uçak kabiliyet listesi [11]

AIRBUS	BOEING	CESSNA	GULFSTREAM	BOMBARDIER	DIAMOND
A300	727	172/F172	G-IV	CL600	DA40
A310	737 CL-NG	510	GV-SP		DA42
A320 Family	757				
A330	767				
A340	777				

Çizelge 2.4 THY Teknik A.Ş. Motor kabiliyet, hizmet listesi [12]

MOTOR KABİLİYET	MOTOR HİZMET
CFMI - CFM56-5C/7B	CFM56-7B motorlarının top casing & VSV bushing işlemleri, AGB/TGB değişimleri, QEC/LRU değişimleri
IAE – V2500	V2500 motorlarının QEC/LRU değişimleri
	GE90 motorlarının QEC/LRU değişimleri
	GE90 fan stator modül söküm / takım işlemleri
	GE90 Stg 6 LPT kanat değişimi
	CF6-80E1 QEC/LRU değişimleri
	TRENT 700 QEC/LRU değişimleri
	CFM56-3/5/7 ve V2500 motor test kabiliyetleri

Bakıma giren motorlar (Çizelge 2.4), montaj sonrası merkezi kaçıklık ve/veya bakım hataları sebebi ile motor test çalıştırma esnasında titreşime sebebiyet verebilmektedir. Limit dışı olan durumlarda uçak motoruna hasar vermemesi ve uçuş güvenliğini riske atmaması adına titreşim azaltma veya kontrol altına alma yöntemleri aranmaktadır.

2.2 Uçuşa Elverişlilik Sertifikası

Uçaklarda (Hava aracı) genel anlamda titreşimlerin ilerde doğurabileceği, hasarı ve/veya kazaları önlemenin birinci amacı uçuş güvenliği sağlamaktır. Bunun ana sebeplerinden bir tanesi, yerel ve ulusal otoriteler tarafından zorunlu kılınan uçuşa elverişlilik durumudur. Uçuşa elverişlilik sertifikası, ülkemizde, T.C. Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü tarafından verilmektedir. Bu sertifika her hava aracı için 1 yıl geçerlilik süresine sahiptir, her yıl yenilenmesi zorunludur [13].

2.3 Titreşimlerin İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri

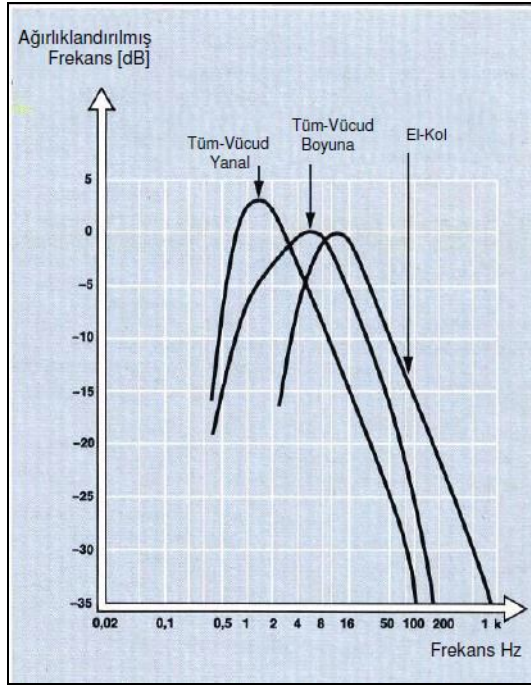
Titreşim, sürekli hareket eden makinelerin veya bir yapının insan hayatına girdiğinden itibaren insanların çok yakın olduğu bir konudur. Kimi makineler ve ekipmanlar için gerekli ve faydalı olan ve hatta tedavi amaçlı kan dolaşımının hızlanması ve kılcal damarlara kan ulaşması için kullanılan titreşim, bazı makinelerde de iş yapma gücümüzü ve hızımızı arttırmaktadır. Örnek olarak, zımpara makineleri, hilti, matkap ve inşaat sektöründe kullanılan beton sıkıştırıcılar vs. İnsanı rahatsız eden, konforu ve güvenliği düşünüldüğünde minimuma indirilmesi gereken bir sorundur aynı zaman da. Bu konuda uzun süredir yapılan titreşimin pasif ve aktif kontrollü çalışmaları, farklı alanda literatürde araştırma olarak yerini almıştır. Uçak iniş takımından, motordan gelen titreşim hareketi insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler bırakabilmektedir. Bu konuda değişik çalışmalar yapılmıştır. Fakat değişen ve sürekli endüstriyel pazar rekabeti sebebi ile konfor algı limitleri değişkenlik gösterdiğinden, uluslararası arena da yapılan çalışmalardaki titreşim sınırları farklılık gösterebilmektedir [14].

İnsan vücudu günlük hayatta makinalar, el aletleri, otobüs, minibüs, tren gibi taşıma araçlarını kullanırken vb. uzun ya da kısa süreli mekanik titreşimlere ve buna bağlı gürültülere maruz kalır. Bu mekanik titreşimler insan vücudu için, rahatlatıcı veya rahatsız edici olabilir. Bu durumu normal bir ses ile dinlenen müzik ile aşırı yüksek ses ile dinlenen müzik şeklinde ifade edebiliriz. Kesintisiz bir şekilde kuvvetli ve uzun süreli mekanik titreşimler, insan vücuduna kalıcı zararlar vermesi muhtemeldir. Bu ve buna benzer parametreler, iş ve işçi sağlığına yönelik uzun soluklu araştırmalar neticesinde de vücudunun mekanik titreşimlere verdiği cevapların bilimsel olarak araştırılma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu ihtiyaç neticesinde yapılan araştırmalar sonucunda ISO insan titreşimleri standartları geliştirilmiş ve uygulanmaya başlamıştır [15].

İnsan vücudunun fiziksel modeli farklı frekans ve yönlerden gelen titreşimlere farklı hassasiyet gösterir. Bu konuyu dikkate alarak yaptığı çalışma sonucu ISO (International Standards Organisation), Şekil 2.8’de görülen üç eğriyi önermiştir.

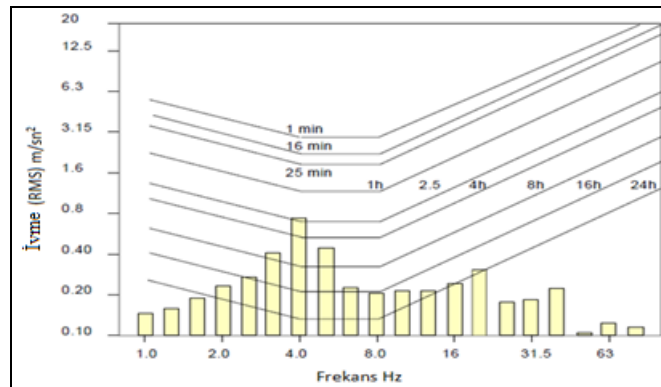
İnsan kafasından ayağına doğru olan doğrultuda insan vücudu 4-8 Hz frekans aralığındaki titreşime duyarlıdır. Ön veya arkasına doğru olan eksen veya omuzları doğrultusunda ise 1-2 Hz frekans aralığındaki titreşime duyarlıdır. 0.1-0.63 Hz frekans

aralığı ise mide bulantısı deniz veya araba tutmasının nedeni olarak kabul edilir. Bu konu birazda insanın yaşı, korkuları vb. gibi psikolojik faktörlere de bağlı olması sebebiyle bu konudaki çalışmaları zorlaştırmaktadır [15].



Şekil 2. 8 İnsan vücudu için ağırlıklandırılmış frekans eğrileri [15]

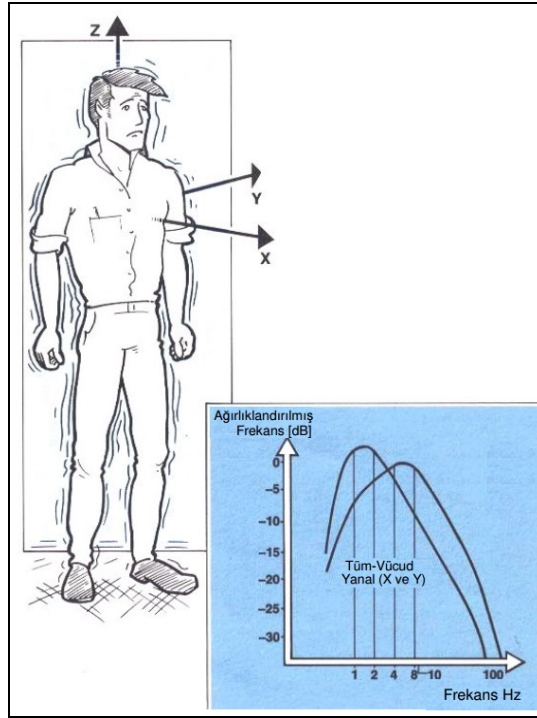
ISO (International Standards Organisation) 2631 kuralları, konfor konusunun her ne kadar insandan insana göre göreceli bir durum olduğunu bildirse de bazı önerilerde bulunmaktadır. İnsan bedeninin tümünün titreşime maruz kalması durumunda titreşimin büyüklüğüne bağlı olarak maruz kalabileceği süreyi sınırlamış olup, Şekil 2.9'da gösterilmektedir [15].



Şekil 2.9 İnsan vücudunun maruz kaldığı titreşime göre rahatsızlık sınır eğrisi [15]

2.3.1 Vücut-Frekans Ağırlık Eğrisi ve Referans Eksen

İnsanın maruz kaldığı vücut titreşimleri, merkezi insan kalbinde olan dik bir eksen takımının tüm doğrultuları boyunca ölçülmelidir. Düşey yön Z ile belirtilen doğrultudur. İnsan bu doğrultuda en çok 4-8 Hz frekans aralığındaki titreşimlere duyarlıdır. İnsanın X ve Y doğrultularındaki titreşimlere olan duyarlılığı birbirlerinden pek farklı olmayıp, bu doğrultularda en çok 1-2 Hz arasındaki titreşimlere karşı hassastır. İnsan vücudunun maruz kaldığı titreşimden kaynaklı oluşan frekans eğrisi ve referans koordinat sistemi, Şekil 2. 10'da gösterilmektedir.

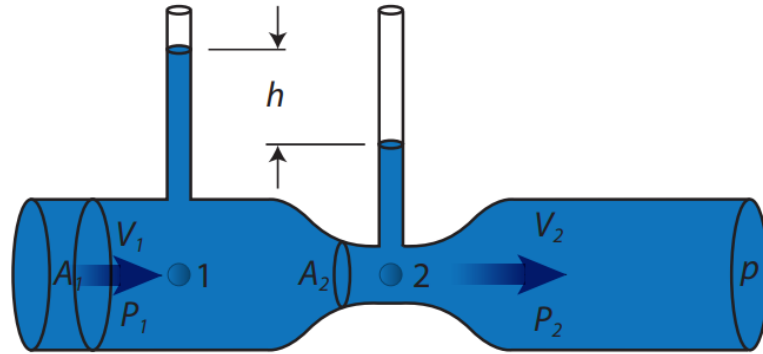


Şekil 2. 10 İnsan vücudu için frekans eğrisi ve referans koordinat takımı [15]

UÇAK VE TURBOFAN UÇAK MOTORLARININ GENEL YAPISI**3.1 Uçakların Genel Yapısı**

Uçuş güvenlik testlerinden geçen, yerel ve uluslararası otoritelerden uygunluk alan uçaklar uçuş hayatına başlayabilmektedirler. Uçaklar genel tasarım olarak uçmaya yönelik biçimlendirilirler, gövde, kanat yapıları tamamen buna odaklı dizayn edilirler.

Temel olarak uçakların uçuş prensibi, Bernoulli prensibine dayanmaktadır (Şekil 3.1), akışanın aynı ortamda farklı hızda davranması neticesinde oluşan basınç farkları sebebi ile kaldırma kuvveti elde edilmektedir.



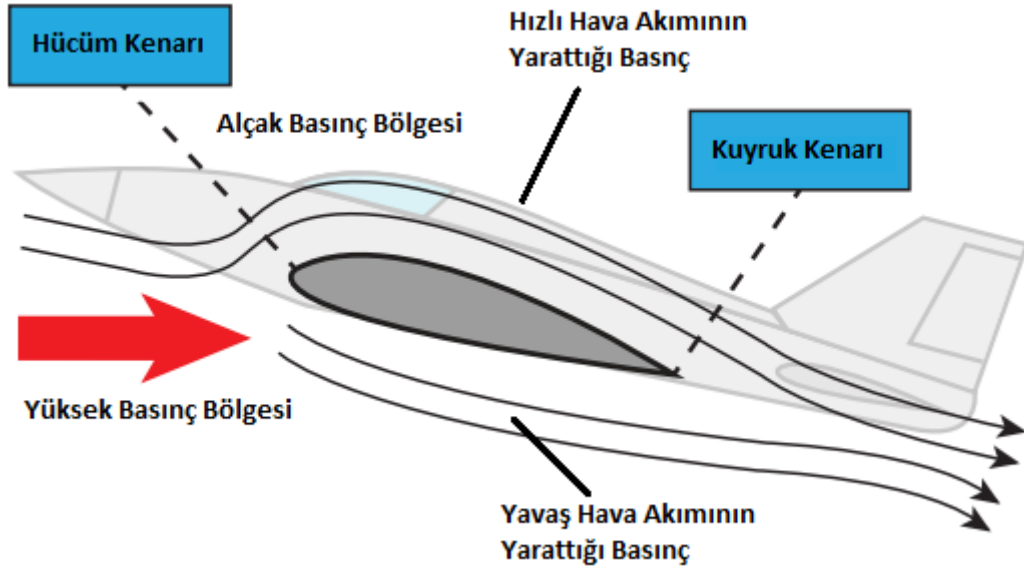
Şekil 3.1 Bernoulli akışkan deneyi

$$Q = A_2 \cdot [V_2]^{1/2} = A_2 \cdot [(2 \cdot (P_1 - P_2) / (\rho \cdot (1 - (A_2 / A_1)^2)))^{1/2}] \quad (3.1)$$

Q: Debi (m³ /s), A: Kesit alanı (m²), P: Basınç (Pa), ρ : Akışkanın Özgül Kütlesi (kg/m³)

Bu temel prensipten yararlanılarak yapılan çalışmalar neticesinde, aerodinamik profil yapısı uçak kanatlarında kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 3.2). Aerodinamik profil yapısı ile uçurulan ilk uçak Wright kardeşler tarafından 17 Aralık 1903'te kayda geçmiştir.

Yapılan çalışmalar ve gelişen teknolojiler sayesinde ticari uçaklarda gelişmiş ve uçağa etki eden ve kontrol edilmesi gereken kuvvetler, detaylı bir şekilde gösterilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.2 Aerodinamik profil

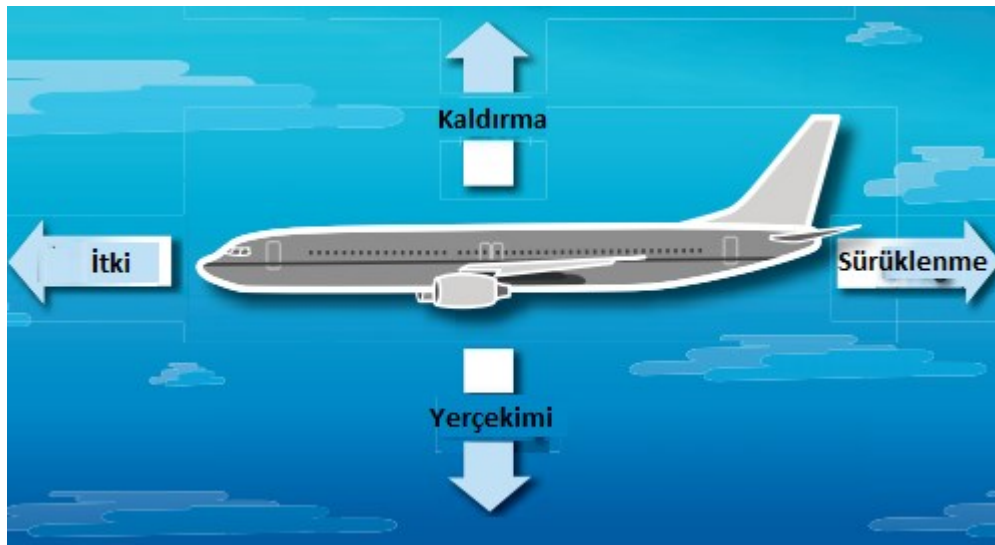
Uçaklar taksi süreci ile pist başına geldikleri zaman pilot dinlemede ve sürekli kule ile irtibat halindedir. Kule, pilota kalkış izni verdikten sonra, pilot tam gaz uçağı hızlandırmak üzere yakıt akışını artırır ve fan kanatları birim zamanda daha çok havayı yanma odasına göndererek itki gücünü artırır. İtki gücü sayesinde hızlanan uçak aerodinamik profil yapısı gereği, ağırlık ve uçak yapısına göre belirli bir hıza geldikten sonra, pilot manivela kolları vasıtası ile burun yukarı yaparak, uçağın pistten teker kesmesini sağlar. Denizcilik ve havacılıkta hız birimi olarak knot kullanılmaktadır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 Knot hız çevrim tablosu [16]

knot	km/sa	m/sn
1	1,852	0,514444444

Pist boyunca sorunsuz bir şekilde hızlanan uçak pilot tarafından göstergesi takip edilerek, daha önceden girilen değerlere göre (yük, yakıt, ortalama yolcu ağırlığı vs.), kalkış hızı belirlenir. Kalkış hızı belirlemede önemli parametrelerden bir tanesi de toplam kalkış ağırlığıdır. Bu parametreye göre belirlenen uçak hızı, kalkış hızına geldiği zaman burun yukarı verilerek, uçağın pistten teker kesmesi sağlanır.

Kalkış hızını yakalayan uçak teker kestikten sonra, dizayn, fiziki parametreleri ve donanımları tamamen uçmaya odaklı olan makine sistemler bütünü, uçuş güvenliği ve konforu maksimum düzeyde tutacak şekilde hava yolculuğuna başlar. Uçak uçuş esnasında uçağa etki eden kuvvetler, detaylı bir şekilde gösterilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Uçağa etki eden kuvvetler

Uçuş irtifa seviyesine ulaşan uçaklar, Çizelge 3.2’de belirtildiği şekilde, toplam ağırlık ve hava koşullarına göre seyir hızını belirlerler. Bu veriler, lineer akışlı hava koşulları düşünülerek yazılmış, araştırma uçak üreticilerinin ve operatörlerin ortalama değerleri alınmıştır.

Çizelge 3.2 Bazı uçak tiplerinin yüklü ağırlıklarına göre kalkış hızları

Uçak Modeli	Kalkış Ağırlığı (lb/kg)	Kalkış Hızı (mph, km/sa, knot)
Boeing 737	100,000 / 45,360	150, 250, 130
Boeing 757	240,000 / 108,860	160, 260, 140
Airbus A320	155,000 / 70,305	170, 275, 150
Airbus A340	571,000 / 259,000	180, 290, 155

Uçuş süresi boyunca, seyir yüksekliğine ve seyir hızına bağlı olarak, Çizelge 3.3, hava akışı düzenli olduğu sürece uçağa etki edecek, titreşime sebep olacak bir unsur uçuş süresi boyunca bulunmamaktadır. Yolcuların konforlu bir şekilde seyahat etmesi operator firmalar tarafından birinci önceliği teşkil etmektedir.

Çizelge 3.3 Bazı uçak tiplerinin yüklü ağırlıklarına göre seyir hızları

Uçak Modeli	Uçuş Yüksekliği (ft/km)	Ekonomik Seyir Hızı (mph, km/sa, knot)
Boeing 737	35,000 / 10,668	583, 938, 507
Airbus A320	37,000 / 11,278	522, 840, 454

3.1.1 Geniş Gövdeli Bir Uçağın Teknik Özelliklerinin İncelenmesi

Bir geniş gövdeli uçak, gövde çapı 5-6 metre, çift koridorlu ve bir sırada 7 ile 10 koltuk mevcut olan uçaklardır. Uçaklarda genel bir kanı olması amacı ile bu bölümde teknik özellikler imalatçı bilgiler baz alınarak verilmektedir. Geniş gövdeli uçaklara örnek olarak, Boeing 787 Dreamliner modeli alınmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Boeing 787 dreamliner [17]

Uçak teknik verileri uçağın tüm parametrelerini etkilediği gibi, yetkili bakım kuruluşlarının da fiziki anlamda nasıl ve ne ölçüde olması gerektiğini de belirleyen kriterlerdir.

Bu bağlamda uçak üreticileri AMM referanslarını bakım kuruluşlarından sağlamasını bekler. Uçak sektörünün uluslararası bir alana yayılarak, oluşan etkileri toplumsal olarak insanları etkilediği için kontrol ve denetleme işlemleri sadece üretici firmaların

inisiyatifine bırakılmamıştır. Bu bağlamda yetkin ve yetkili, yerel ve uluslararası kuruluşlar vardır. IATA, EASA, FAA, FAR, SHGM bunların başında gelir.

Geniş gövdeli bir uçak için teknik verileri detaylı bir şekilde verilmiştir (Çizelge 3.4). Bu veriler kullanılarak havalimanı ve hangar koşulları ile genel şartlar belirlenmek zorundadır [17].

Çizelge 3.4 Model 787-10 teknik özellikleri [17]

Koltuk (2 Sınıf)	330
Menzil nm (km)	6,430 nmi (11,910 km)
Uzunluk	68 m (224 ft)
Kanat Açıklığı	60 m (197 ft)
Yükseklik	17 m (56 ft)
Motor	GEnx-1B / Trent 1000
Boş Ağırlık	135,500 kg / 298,700 lb
Yakıt Kapasitesi	126,372 lt / 36,384 US gal

3.1.2 Dar Gövdeli Bir Uçağın Teknik Özelliklerinin İncelenmesi

Bir dar gövdeli uçak, gövde çapı 3-4 metre, tek koridorlu ve bir sırada 2 ile 6 koltuk olacak şekilde imal edilen uçaklardır. Dar gövdeli uçaklar hakkında genel bir kanı olması amacı ile bu bölümde teknik özellikler imalatçı bilgileri baz alınarak verilmektedir. Dar gövdeli uçaklara örnek olarak, Arbus A321 neo modeli alınmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Airbus A321neo [18]

Ticari ve özel uçuş hayatına başlayan tüm uçakların belirli periyotlar ile bakıma girmesi gerekmektedir. Bu bağlamda incelenen dar gövdeli uçak için de havalimanı ve hangar şartları detaylı bir şekilde belirtilmiştir [18]. Bu teknik veriler ışığında ilgili havalimanı ve

bakım kuruluşlarının maddeleri yerine getirmeleri zorunludur. Uçuş hayatı başlayan tüm uçakların, teknik özellikleri, tüm bakım dökümanları bakım kuruluşları tarafından muhafaza edilmesi, uçak sahibi operatör firma tarafından da muhafaza edilmesi gerekmektedir (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5 Model A321neo teknik Özellikleri [19]

Koltuk (2 Sınıf)	206
Menzil nm (km)	4,598 nmi (7,400 km)
Uzunluk	44,51 m (146 ft)
Kanat Açıklığı	35,80 m (117 ft)
Yükseklik	11,76 m (39 ft)
Motor	LEAP-1B / PW1100G-JM
Boş Ağırlık	48,500 kg
Yakıt Kapasitesi	23,490 lt / 6,205 US gal

3.2 Uçak Motorları

Bir uçağı uçurmak için gerekli birçok bileşen vardır, bu çalışmamızda bu bileşenleri komponent olarak niteleyeceğiz ve bundan sonra komponent olarak bahsedeceğiz. Bu komponentlerin en önemlisi ve itici gücü sağlayan uçak motorudur. Uçağı satın alan kişi/kurum ve/veya kuruluşlar, bazen seçilen uçak modeli için sabit olan motoru direkt almak veya farklı seçenekler sunarak seçim yapmak zorundadırlar.

Uçaklar aerodinamik yapıları gereği uçmaya odaklı dizayn edilmektedir. Günümüzde aerodinamik yapıyı, istenilen yüksekte ve hızda itici güç oluşturabilecek çeşitli motor tipleri kullanılmaktadır. Uçaklarda kullanılan motor çeşitleri;

Turbofan motorlar [4].

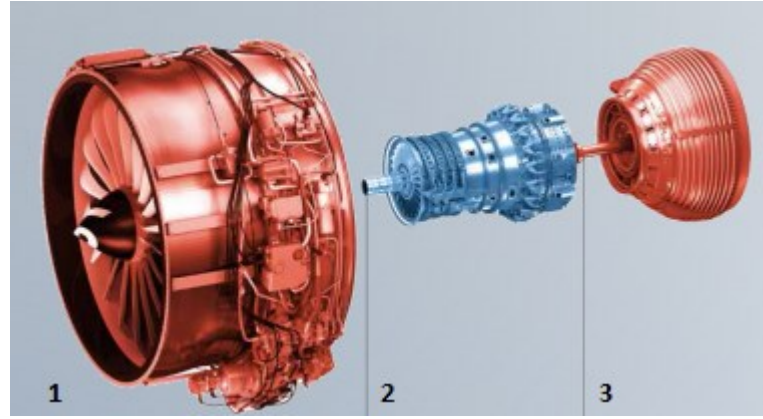
- Pistonlu motorlar
- Turboprop motorlar
- Turbojet motorlar
- Ramjet ve Pulsejet motorlar
- Roket motorları

Bu çalışmada, turbofan motorlarda fan kanat kaynaklı titreşimlerin deneysel yöntemler ile azaltılması incelenecektir.

3.3 Uçak Motorlarının Genel Yapısı

Uçak motorları her türlü hava koşullarına ve dinamik zorlamalara karşı durmaksızın çalışmaya göre kriterleri belirlenmekte, malzeme seçiminden dizayn ve imalat aşamasında kadar titizlikle takip edilmektedir.

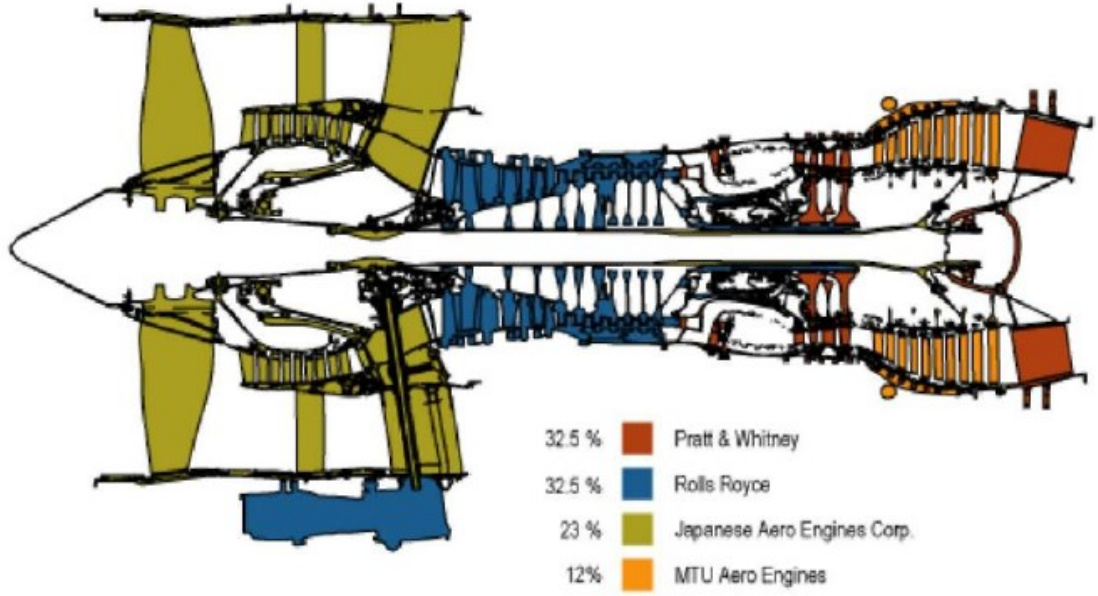
Dünyada turbofan uçak motor üreticileri son teknoloji yöntemlerini tasarım, imalat ve montaj işlemlerine kadar detaylı bir şekilde kullanmaktadır. En büyük kriter uçuş güvenliği, insan sağlığına etkilerinin azaltılması ve ekonomik değerler gelmektedir.



Şekil 3.6 Farklı firmalar tarafından imal edilen motor bölümleri

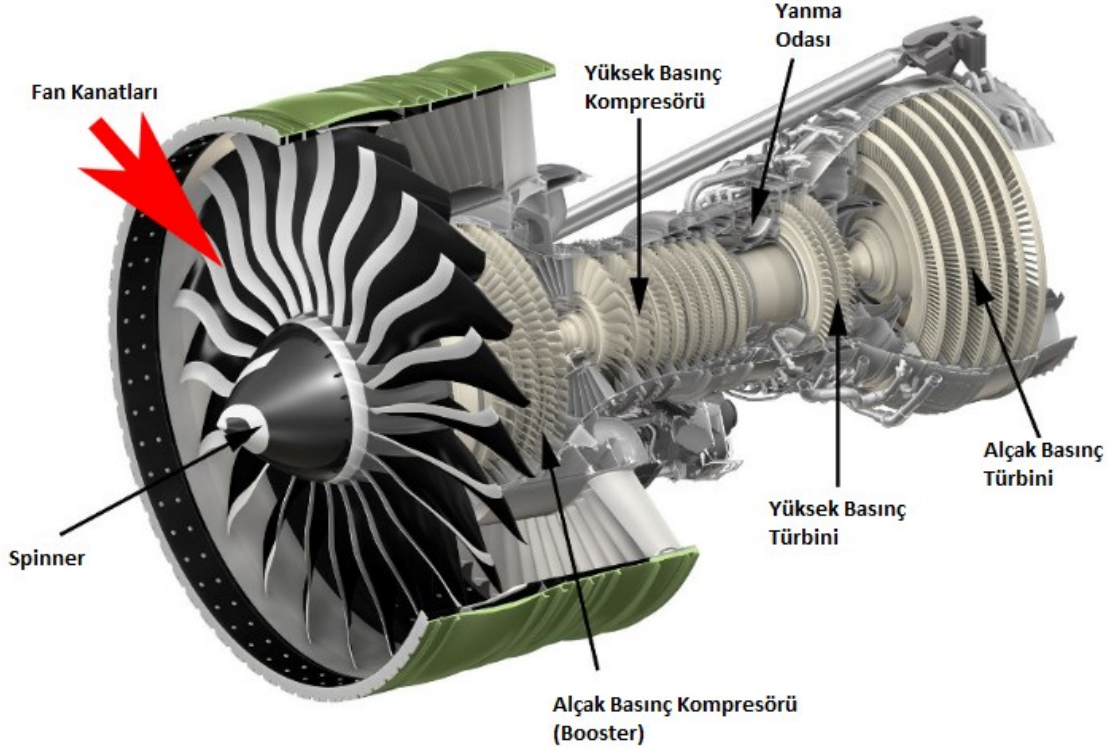
Uçak motorlarının farklı bölümlerinin farklı firmalar tarafından imal edilmesi de (Şekil 3.6, 3.7), imalat teknolojisinin hassasiyetini, standardını günden güne arttırmaktadır. Farklı motor bölümleri Şekil 3.6’da detaylı olarak belirtilmiştir.

- 1.Fan ve düşük basınçlı kompresör
- 2.Yüksek basınçlı gövde
- 3.Düşük basınçlı türbin



Şekil 3.7 V2500 motor parçalarını üreten firmalar

Uçak ve uçak motorunun milyonlarca parçası farklı firmalar tarafından imal edilmektedir, bunu kusursuz bir şekilde konser veren bir orkestraya benzetebiliriz. En son olarak, montaj hattının nizami bir şekilde işlemesi, montajlarının tamamlanarak uçuşa verilmesi ile bu makinelerin yıllarca güvenli bir şekilde misafirlerini istediklere yerlere ulaştırmalarını sağlamaktadır.



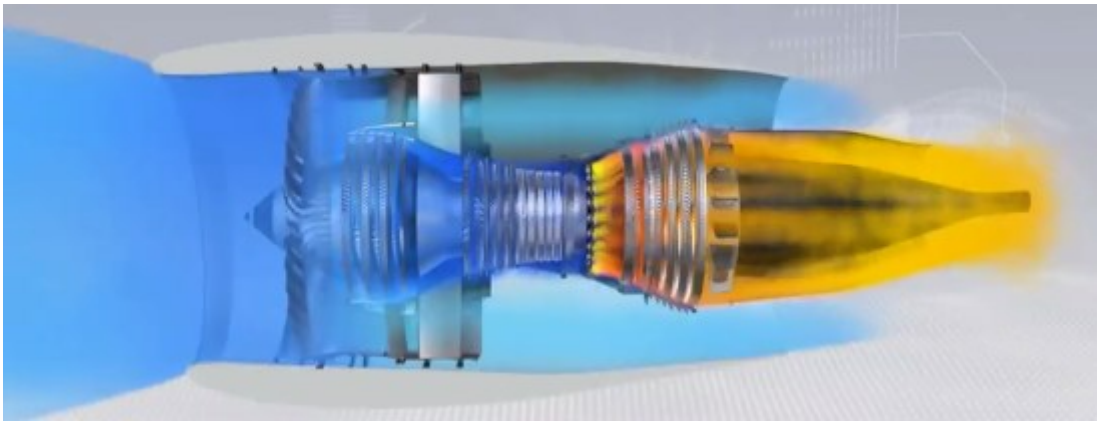
Şekil 3.8 Turbofan uçak motoru bölümleri [20]

Turbofan uçak motorlarının genel yapısı bölümleri, detaylı bir şekilde gösterilmiştir (Şekil 3.8).

3.4 Uçak Motorlarının Çalışma Prensibi

Uçak motorları birbiri içerisinde dönebilen ve hız tahrikini dönme hızına göre ayarlayan, bir makine düzeneğidir (Şekil 3.9). Bu makineler, ön taraftan fan ile içeri alınan havanın yakıt ile karıştırılıp yanma odasında yakılarak oluşan patlama neticesinde egzoz çıkış hattından entropisi yüksek olan havanın hızlı bir şekilde çıkması neticesinde oluşan itiş kuvveti elde edilmesi sonucu çalışır. Yanma odasında sıkıştırılan sıcak entropisi yüksek hava aniden dışarı çıkmak ister ve motorun arka(egzos) hattında çok büyük bir itme kuvveti oluşturur. Etki tepki prensibi gereği çalışmaktadır. Şekil 3.9'da, soğuk hava mavi, sıcak hava turuncu renk ile belirtilmiştir. İtilmek istenilen

hava bu kuvvete tepki gösterecek ve motorun ileriye doğru hareket etmesini sağlayacaktır. Önden alınan hava çok büyük bir vakum oluşturmamakla beraber, motor fanının yakıt ve yanma hızına göre devri nispetinde havayı motor içerisine alır. Alınan havanın, motor tip ve kapasitesine göre bir kısmı yanma odasına emilmeden soğutma amacı ile kullanılır, yanma odasına emilen hava da direkt yakıt ile karıştırılarak yakılır. Motor yanma odasında yanan hava yakıt karışımı ani ve büyük genişleme isteği duyduğu için, yanma odasında bulunun bu hızlı akışkanı derhal atmak ister. Motor dizayn gereği de egzoz hattından atılan hava müthiş bir itki gücü meydana getirerek ton'larca ağırlıktaki hava araçlarını ileriye doğru hızlandırır [4].



Şekil 3.9 Uçak motorları çalışma esnasında oluşan akışkan karakteristikleri

Uçağın pist ve uçuş süreci düşünüldüğünde uçak motorlarının iki ana görevi olduğu belirtilebilir. Kalkış yapacak uçağın atalet ve sürüklenme kuvvetlerini yenerek ivmelenmesini sağlamak ve hedef hıza ulaştırmak, ikinci madde olarak ise uçuş seyri hızını aerodinamik yapı ve uçuş güvenliği sınırları içerisinde uçağa uykulanan test itkiye karşı ileriye yönelik itki kuvveti oluşturmak. Bu da uçağın istenilen sınırlar içerisinde uçmasını sağlamaktadır.

Uçak motoru çalışma esnasında limit içi ve limit dışı titreşimlerini uçak gövdesine titreşimlerini, kanat motor ara bağlantı noktası olan paylon (uçak motoru ile kanat arasındaki bağlantı noktası), vasıtası ile iletmektedir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Paylon bölgesi

3.4.1 Fan Kanat Yapısı ve Motordaki Konumu

Motorun fanı ve fan kanatları, güçlü ve kritik parçalardır (Şekil 3.11 ve Şekil 3.14). Kütlesi ve sabit yüksek hızla dönüşü, özellikle dengenin dışına çıkmaya açık olmasını sağlar (Şekil 3.13). Fan kanatları dengesiz olduğunda, kabinde titreşim sonucu fazla miktarda gürültü, rahatsızlık ve sallantı yaratabilir. Dengesizliğin devam etmesine izin verilirse, bıçaklara, motora ve kritik uçak bileşenlerine zarar verebilir. Bu durum, uçuş öncesi ve uçuş sonrası kesinlikle istenilmeyen bir durumdur.



Şekil 3.11 Karbonfiber fan kanat kalıbı

Orijinal üreticinin hattından yeni çıkan bir uçak motoru veya türbin düzeneği ideal seviyede çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Fan kanat ve bıçak yerleşimleri en yüksek performans için optimize edilmiştir, ancak bir veya daha fazla kanat veya bıçakta hasar meydana gelirse, dengesiz bir durum yaratabilir. Fan kanatlarının aşınması, daha önce yaşanmış yabancı madde hasarı, onarımları ve hatta normal aşınma gibi diğer koşullar fan kanatlarının dengesizliğine katkıda bulunabilir (Şekil 3.12). Fan kanatlarının dengesini etkileyebilecek diğer bir durum da hasarlı ve aşınmış fan kanatlarının değiştirilmesidir. Çoğu durumda, fan kanatları, hasar görmüş veya aşınmış kanadın simetrik olan eşi ile değiştirilmektedir. Fan kanat çiftleri olarak adlandırılır.

Şekil 3.12 Uçak motoruna zara verebilecek yabancı malzemeler



Şekil 3.13 Fan kanatlarının motordaki konumu



Şekil 3.14 Yeni nesil kompozit fan kanat yapısı

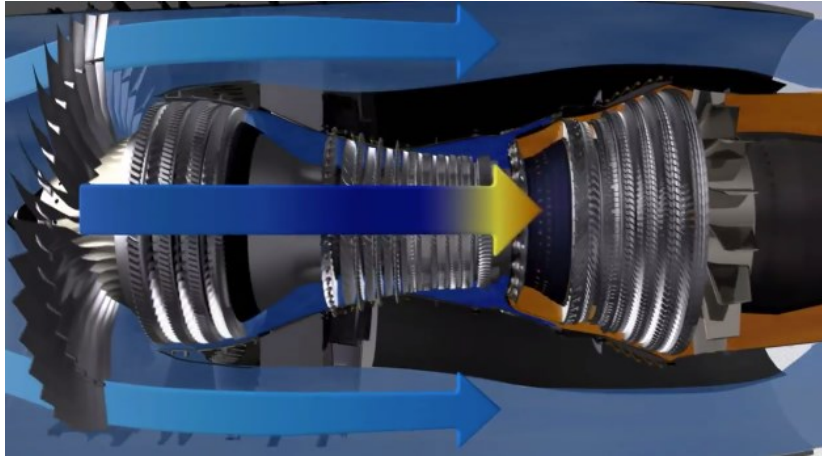
3.5 Uçak ve Motor Bakımında Karşılaşılan Hatalar

Uçak bakım ve motor hizmeti, doğrudan doğruya insana bağımlı bir hizmettir. Otomasyon, teknolojik olanaklar hatta ekonomik destek ne kadar ileri düzeyde olursa olsun, bakımı ve kontrolünü gerçekleştirecekler sistemin en değerli yapı taşı personelin direkt kendisidir. Hataları önleyecekler, hata yapmayı engelleyecek sistemleri kuracak olanlar yine "onlar"dır. Bakımın amacı teknik tehir ve arızaları en düşük düzeyde tutarak, emniyetli bir uçuş sağlamaktır. Bakımdaki insan hatalarına da bu çerçeveden bakmakta yarar vardır. Hatalar, teknisyenin neden olduğu ve teknisyenin neden olmadığı arızalar modelinde iki şekilde ortaya çıkmaktadır. Bunlardan en önemlisi uçak bakıma girmeden önce "var olmayan" arızalardır. Bakım sırasında uygulanan her bakım işlemi istenmeyen ve beklenmeyen bir arızanın ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu arıza fark edilmeyebilir. Herhangi bir komponentin yanlış montajı, bir kablonun kopması, conta takılmaması gibi. İkinci tür arızalar ise bakıma giren uçakta var olanlardır. Bu tür arızalarda kritik olan konu; bakım kartında kontrolü gereken fakat kontroller sırasında belirlenemeyen arızalardır. Gözle kontrol gerektiren yapısal bir çatlağın veya korozyonun görülememesi, hatalı arıza arama sonucunda, arızalı bir komponent yerine başka bir komponentin değiştirilmesi gibi olaylarla karşılaşılabilir (Şekil 3.15).

İngiliz Sivil Havacılık Kuruluşu-UK CAA, uçak bakımında karşılaşılan hataları aşağıdaki başlıklarda sınırlamıştır:

1. Komponentlerin hatalı montajı,
2. Yanlış parçaların takılması,
3. Elektrik kablolarında yapılan hatalar,
4. Uçakta takım vb malzemenin unutulması,
5. Yetersiz yağlama yapılması,
6. Kaportaların, ulaşım panellerin, koruyucu kapakların tespit edilmemesi,
7. İniş takımı emniyet pinlerinin kalkıştan önce sökülmemiş olması,
8. Bağlama elemanlarının tam olarak takılmaması veya torklanmaması

Tüm sistemlerin ve regülasyonların öngördüğü en önemli konu ; yapılan işlemlerin kayıtlarının, işlem yapıldıkça ve beklemeden tutulmasıdır. Yani basit bir anlatımla kuralımız: "yazılanı yap, yaptığını yaz" olarak özetlenebilir. Filoyu uçuşa elverişli durumda tutabilmek üzere, uçak işleticileri için, Boeing'in bir yılda yayınladığı dokümanların yüksekliğinin Everest tepesinden daha fazla olduğu belirtilmektedir. Bu noktada "uçak ağırlığına kâğıtla uçar" deyimini bir defa daha tekrarlanmış olmaktadır. Ancak bakımda kullanılan tüm bu bilgilerin güncel ve kullanıcılar (mühendisler, onaylayıcı teknisyenler, bakım teknisyenleri, inspektörler) tarafından kolay anlaşılabilir nitelikte olması gerekmektedir. İngilizce dokümanların basitleştirilmiş İngilizce ile hazırlanması büyük önem taşır.



Şekil 3.15 Bakım hatası veya yabancı bir parçanın etki ve zarar yolu

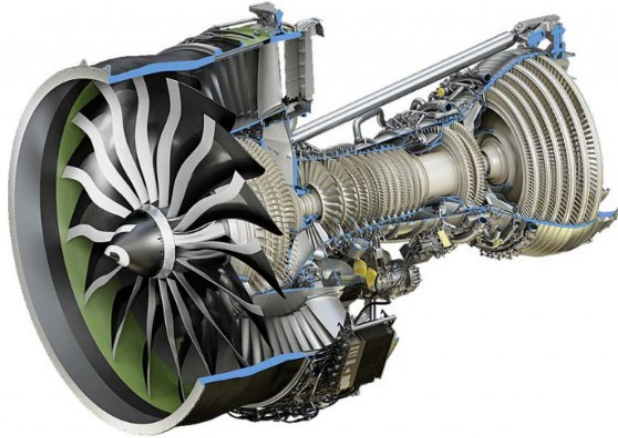
3.5.1 Uçak Motor Fan Kanadı Dengelemesi

Bir fan veya türbinin dengesiz hale gelip gelmediğini ve ne dereceye kadar olduğunu ölçmek için bir titreşim spektrumu araştırması yapılmalıdır. Test sonuçları verilirse, teknisyenler fan düzeneğini incelemeye devam edebilir, onarım veya değişiklik yapabilir ve titreşim seviyelerini kabul edilebilir bir seviyeye getirmek için fan trim dengesi gerçekleştirebilir. Bu işlemlerin adım adım teknik yeterliliğe ve kabiliyete sahip personeller tarafından yapılması çok önemlidir. Bundan sonra, yapılacak herhangi bir

hata geri dönüşü olmayan zararlara yol açabilir. Teknik anlamda tüm kullanım kılavuzların ve ilgili üretici firmanın belirttiği kural ve adımlara tek tek uyulmalıdır.

Bu işlem için kullanılan analizörler, teknisyenlerin fan ve türbin dengelemesinde daha akıllı ve hızlı çalışmasına yardımcı olmak ve uçaklarını mükemmel çalışma koşullarında tutmak için en üst düzeyde mühendislik ve işleme sağlar.

Uçak motorları sökme ve toplama işlemlerinde itina ile davranılmalıdır, sökülen yapı gerekli işlemler yapıldıktan sonra tekrar merkezli, dengeli bir şekilde sıra ile tek tek montaj işlemleri yapılmalıdır. Uçak motorunun ne kadar kompleks ve ustalık gerektiren bir yapıya sahip olduğu Şekil 3.16’de görülmektedir.



Şekil 3. 16 Uçak motorlarının genel yapısı, GE9X ticari uçak motoru

3.6 Fan Kanatları Kaynaklı Titreşimler

Titreşimlerin ortaya çıkmasının birçok nedeni vardır. Örneğin dengesiz bir fan kanadı, disk, her devir sırasında hissedilen periyodik titreşimlere neden olabilir. Bazı titreşimler, mutlaka bir problemin göstergesi değil, mekanik sistemlerin normal çalışma koşuludur. Ciddi konulara değinmemek veya gereksiz onarımlar yapmamak için titreşim tipleri arasındaki farkı bilmek önemlidir. Bu bağlamda kullanılan teknik ekipman ve ölçüm sistemleri cihazları önem taşımaktadır. Uçaklar her daim uçmaya odaklıdır, operatör firmalar ve uçak sahipleri, uçaklarının en az yerde kalmalarını talep eder ve bu doğrultuda hızlı ve güvenli bir şekilde uçaklarını tekrar bakımdan almak isterler.

Uçak motorlarının hızlı ve ağır şartlarda çalışması, sıcak soğuk her türlü zorlamalarda rijit yapısını bozmaması gerekmektedir. Uzun saatler süren uçuş sonrası yanma haznesinde 1700 °C lere kadar çıkan sıcaklık değerleri görülmektedir. Bu şartlara dayanabilen özel malzemeler, ticari haklar gereği gizli tutulmakta ve kimyasal yapıları ve imalat süreçleri paylaşılmamaktadır.



Şekil 3.17 Genx 1B [22]

Uçakların ve uçak motorlarının yapıları oldukça karmaşıktır (Şekil 3.17). Uçak sektörüne destek veren tüm kuruluşlar, belirli seviyede eğitim ve yetkinliğe sahip olmaları gerekmektedir. Gerekli yetkinlik seviyesine, detaylı eğitim ve pratik uygulamalar ile ulaşılmakta, belirli periyotlar ile de kontrol edilmektedir. Bu eğitim ve teknik uygulamalara rağmen aksaklıklar ve bakım hataları meydana gelmektedir. Sürekli denetlenen bakım kuruluşları ve personelleri, zaman içerisinde karşılaştıkları durumlar ile daha da tecrübe kazanmaktadırlar.

Çizelge 3.6 Motor tiplerine göre fan kanat sayıları

GE90-115B	22 Adet
CF6-80E1A3	34 Adet
CFM56 Family (Eski – Yeni)	44 -22 Adet
LEAP 1-A	18 Adet

Bakım esnasında tek tek söküm işlemleri yapılan fan kanatlarının, itinalı bir şekilde tekrar simetrik bir şekilde toplanması gerekmektedir (Şekil 3.18 ve Şekil 5.13).



Şekil 3.18 Fan kanat motor diski montaj noktası

Bakım esnasında yapılan hatalar sebebi ile de uçak motor fan kanatlarında titreşimler meydana gelebilmektedir. Simetrik montaj hataları, bakım esnasında fan kanatlarında meydana gelen kütleli kayıplar, sürekli dönen bir yapıda merkez kaç kuvvetlerinin

dengeşiz olmasına ve titreşimlerin meydana gelmesine sebebiyet vermektedir (Çizelge 3.6).

Rutin veya rutin olmayan sebeplerden dolayı bakıma giren uçak motorları bakım sonrası sıfır hata ile montaj işlemlerinin simetrik (Şekil 3.19) ve sistematik yapılması gerekmektedir. Bu esnada fan kanatları ve fan kanatlarının takıldığı bilezik aksamaları eksik veya fazla malzeme montajı sebebi ile dengeşiz dönmektedir. Merkez kaç kuvvetlerinin kontrol dışı kalması ile istenmeyen titreşimler meydana gelmektedir. Bu çalışmada, bu işlemlerin motor test işlemi yapılmadan önce kestirilebilmesi ve daha az masraf ve zaman kaybı ile montaj işlemlerinin tek kalemde güvenli bir şekilde tamamlanması hedeflenmiştir.



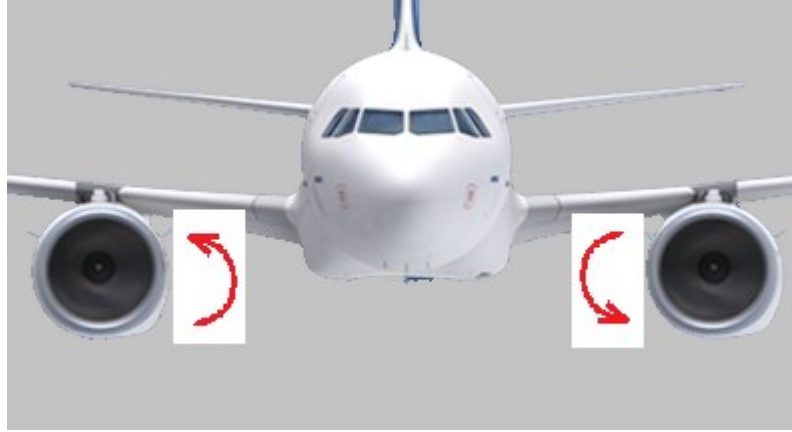
Şekil 3.19 GE90-115B Fan kanat simetrik montaj işlemleri

UÇAK MOTOR FAN KANATLARI

4.1 Uçak Motorlarının Dinamik Davranışlarının Değerlendirilmesi

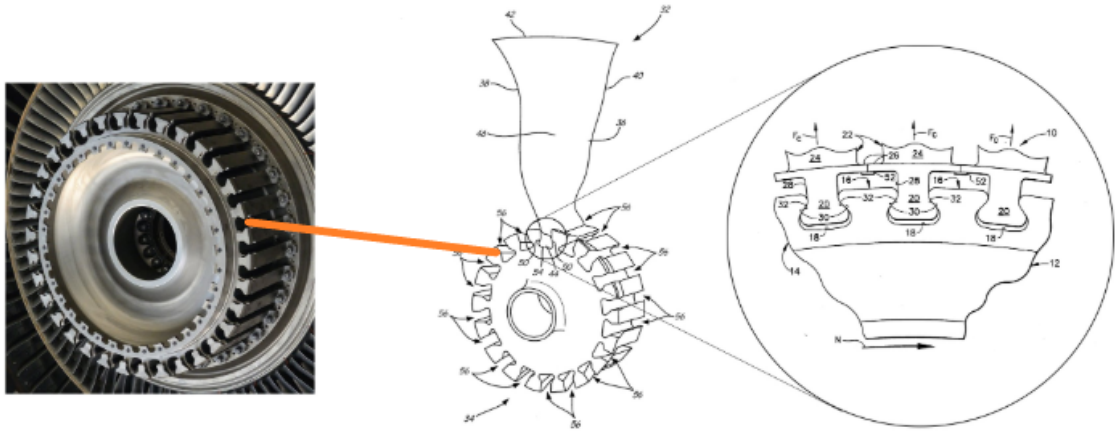
Uçak motorlarının hareketinin ortaya çıkardığı sonuçların incelenmesi, ilk olarak uçak motorlarının fiziksel modeli oluşturularak yapılmaktadır. Bu alanda yapılan direkt çalışmalar nadir olmakla birlikte, daha çok imalatçı ve bakım kuruluşları tarafından, uçak sistemlerinde bulunan bilgisayar çıktıları ve oradan elde edilen veriler ışığında çözümler bulunmaktadır. Genel anlamda, titreşim kontrol sistemleri üç başlık altında incelenmekte ve çözümler bu yollar kullanılarak bulunmaktadır. Yapılan bilimsel çalışmaların alt yapıları da, bu kontrol sistemlerin matematiksel modellemesine ve daha sonra uygulamaya yönelik yapılmaktadır.

Uçak motoru kurulum ve bakım işlemleri bittikten sonra, bakım kuruluşu tarafından teste tabii tutulur. Dönen makine sistemleri, motor içerisinde bir dengesizlik olduğu takdirde, yapıya bir salınım uygular. Bu durumun sürekli olması, ana yapıyı etkilemeye ve zarar vermeye başlar. Uçak motoru, ana yapıya paylon vasıtası ile bağlanmaktadır, fan kanat dönüş yönleri bu istikamete bakarak ifade edilir (Şekil 4.1). Oluşan titreşimler, direkt kanat vasıtası ile uçak gövdesine iletilmektedir. Bu çalışmada direkt uçak motoru fan disklerine bağlanan fan kanatlarının titreşim azaltılması işlemleri, test yolu ile yapılacaktır. Fan kanatları bağlantı noktası, fan disk temiz ve hasarsız olmalıdır (Şekil 4.2).



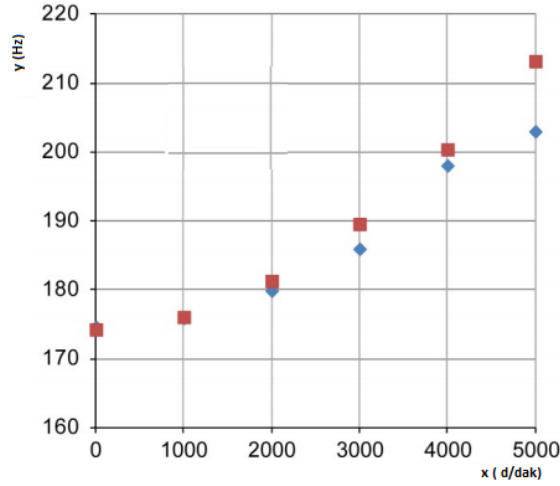
Şekil 4.1 Ticari uçaklarda fan kanatları dönüş yönü

Fan kanatları sıralı bir şekilde (söküldüğü sıra) ile değişim gerektiren fan kanatları hariç, nizami bir şekilde temizlenen fan disk yuvalarına takılmak zorundadır. Bu işlem tüm motor komponentleri için geçerlidir.



Şekil 4.2 Fan disk ve fan kanatları bağlantı noktaları

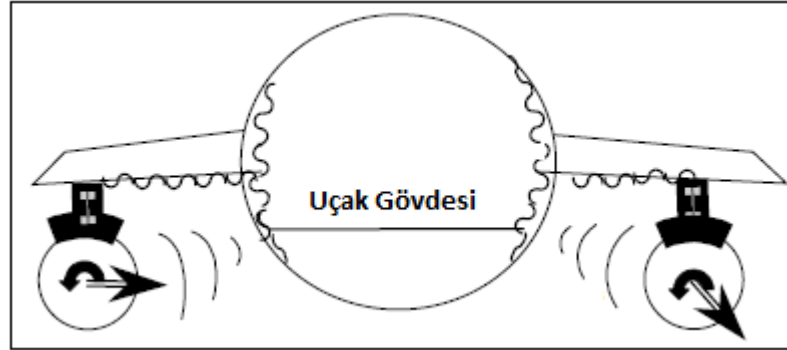
Fan kanatları merkezi bir eksen etrafında yüksek hızlar ile dönmesi sebebi ile (Şekil 4.3), sabit ayarlanmış karşı yükler kullanılarak, pasif kontrol sistemleri ile çözüm yoluna gidilecektir. Bu çalışmada uzun süre dayanıklılık ve maliyet açısından yapıya en uygun yöntem olması sebebi ile ayarlanmış pasif sönümleyicileri kullanılacaktır.



Şekil 4.3 Fan kanat ilk rezonans frekansı (y (Hz)), Fan kanat dönüş hızı (x (d/dak)) [23]

4.2 Titreşim Sönümleyici (Denge Vidaları) ile Kontrol

Uçak motorları kanat altı montaj sistemi ile uçak kanadına vidalar vasıtası ile monte edilmektedir. DePriest[5] tarafından yapılan modellemede, uçak motorlarının çalışması esnasında oluşan titreşim iletim yolları gösterilmektedir (Şekil 4.4).

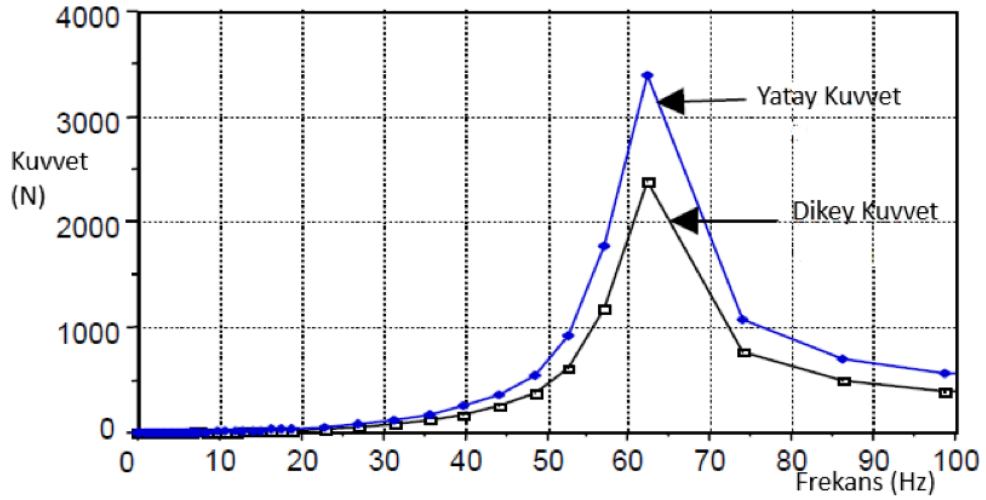


Şekil 4.4 Motor fan kanadı kaynaklı titreşim [5]

Fan kanat titreşimleri veya harici başka sebeplerden dolayı oluşan titreşimler, direkt gövdeye ve kabine iletilmekte olup, yolcular tarafından hissedilmektedir. Balta ve Güçlü [8] yaptıkları çalışmada insan konforunu ve sağlığını etkileyen durumları incelemiş ve ilgili titreşim aralıklarını çalışmalarında belirtmişlerdir.

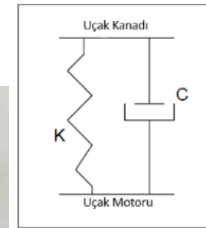
Pasif titreşim sönümleyici varken ve yokken ticari uçak motor arka kısmında meydana gelen titreşim kuvveti gösterilmiştir (Şekil 4.5 ve Şekil 4.7). Bazı frekans değerlerinin gerilediği ve kontrol altına alınabildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışma, fan kanatlarında

merkez kaç kuvvet kaynaklı, kütle merkezinin değişmesine yol açan dengesizliklerin, dengeleyici pasif sönümleyiciler ile titreşimin azaltılabildiğini göstermektedir (Şekil 4.6 ve Şekil 4.7).



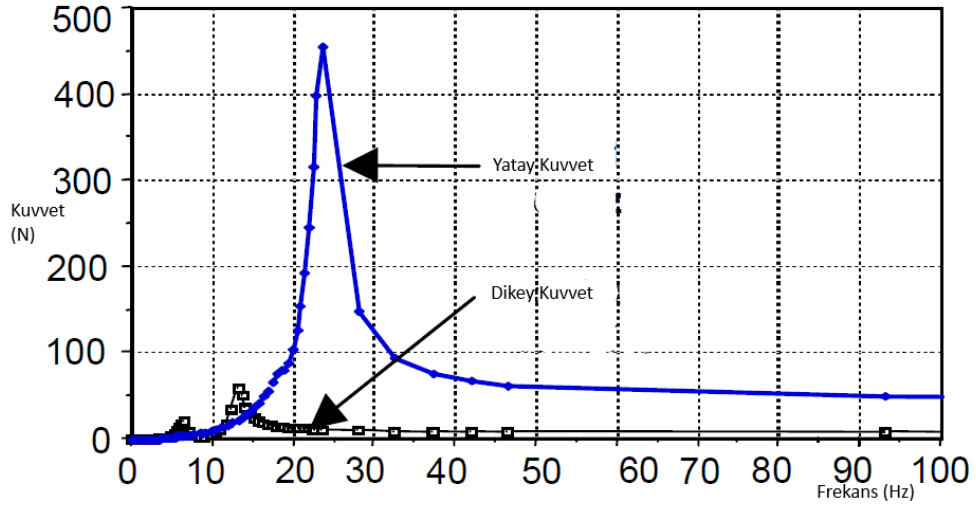
Şekil 4.5 Ticari bir uçak motorun arka montaj kısmın kuvvet ve frekans ölçümleri (Dengesiz) [5]

Yapılan bu çalışmada pasif titreşim sönümleyici olmadan Şekil 4.5, ticari uçak motor arka kısmında meydana gelen frekans-kuvvet eğrisi Şekil 4.7, incelendiğinde, bazı tepe değerlerinin gerilediği ve kontrol altına alınabildiği gözlemlenmiştir [5].



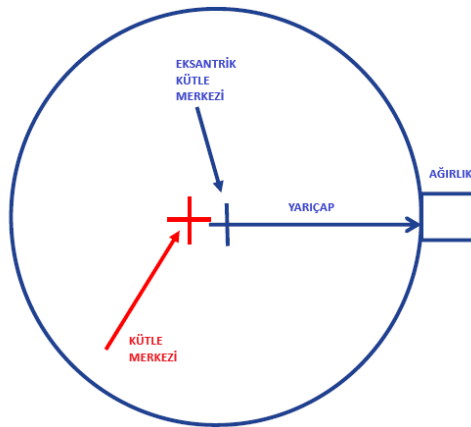
Şekil 4.6 Pasif titreşim sönümleyici

Bu çalışma, fan kanatlarında merkez kaç kuvvet kaynaklı Şekil 4.5, kütle merkezinin değişmesine yol açan titreşim kaynaklarının dengeleyici pasif kuvvetler ile sönümlenebileceğini göstermektedir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Ticari bir uçak motorun arka montaj kısmın kuvvet ve frekans ölçümleri (Dengeli)[5]

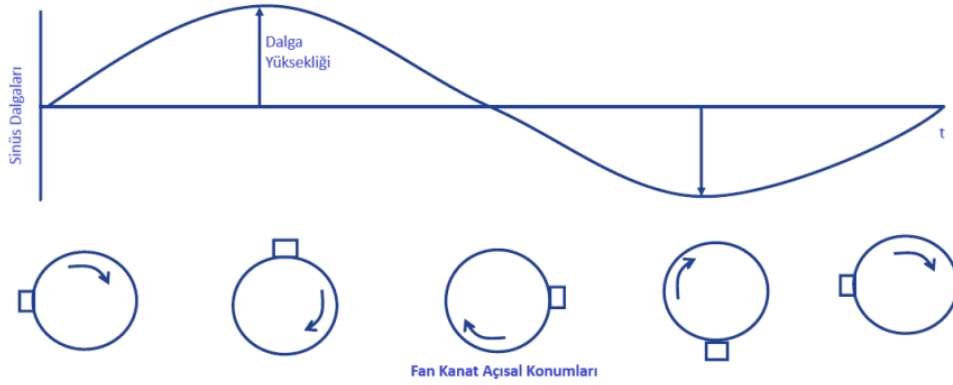
Ayarlanmış kütleye sahip titreşim emiciler, 600 Hz'e kadar titreşim problemlerini çözümlayebilmektedirler. Fan kanatları, ayarlanmış vida ağırlıklarıyla dengelenmektedir. Ticari uçaklarda kullanılan motorlarda N1, 175 Hz'e ve Boeing 737, 85 Hz'e kadar fan kanat titreşimleri, N2 şaftı yüksek basınçlı kompresör sebebi ile 433 Hz'e kadar titreşim değerleri çıkabilmektedir. Bu hızlarda dönen yapılarda, kütleli dengesizlik titreşimlere sebep olmaktadır. Uçaklarda kanada montajı yapılan motorlardaki N1 şaftı sebebiyle merkezi kaçıklıklar, fan kanatlarının dengesiz dönmesine sebep olmaktadır. Bu durum, titreşimi ve konforu etkilemektedir.



Şekil 4.8 Tek merkezden dönen fan kanatlarının dengesizlik durumu

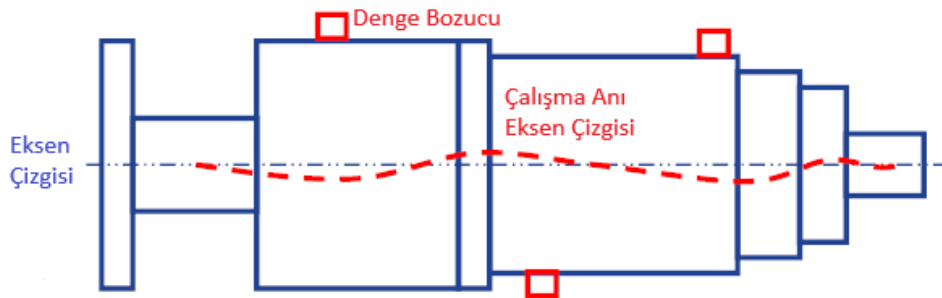
Ticari uçaklarda kanada montaj yapılan uçak motorlarında ki N1 sebebi merkezi kaçıklıklar, fan kanatlarının dengesiz dönmesine sebep olmaktadır (Şekil 4.8). Bu durum, titreşim ve konforu etkilemektedir.

Motorun direkt ana yapıya, sert bir ara malzeme yerine yumuşak bir ara malzeme ile bağlanması, titreşimin kabine iletilmesinde de farklılık arz etmektedir. Sert malzemede titreşim iletimi daha fazla olmaktadır.



Şekil 4.9 Fan kanat mili üzerinde ekstanriklik titreşim konumları

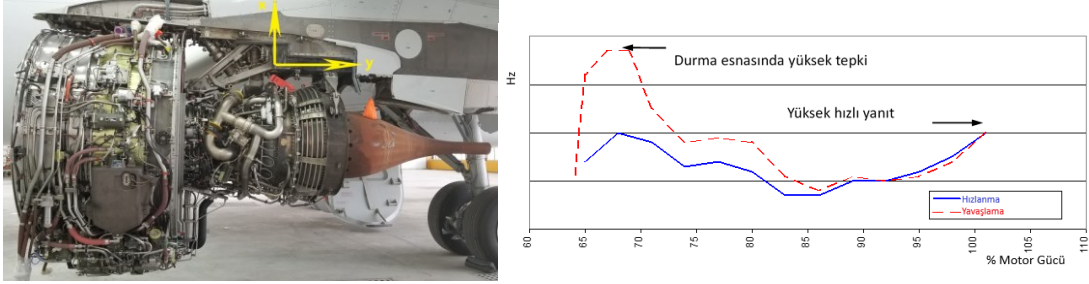
Fan kanat dengesizlikleri sebebi ile oluşan merkez kaçıklıklarının önlenmesi ile de uçuş konforunun dahada kaliteli seviyeye çıkartılacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.10 Döner fan kanadının maruz kaldığı merkez kaç kuvvetleri

Döner mil üzerinde değişik noktalarda meydana gelen merkezkaç kuvvetlerinin dengesizliği sonucu, mil boyunca meydana gelen dengesizlikler de titreşim artırıcı rol üstlenmektedirler (Şekil 4.10). Bu durum genel anlamda N1 ve N2 hızlarını ve bu ana yapıya bağlı tüm malzemeleri etkilemektedir.

Motor titreşiminin yüksek değerlerinin başlama ve durma zamanlarında tespit edildiği görülmektedir (Şekil 4.11). Ayrıca, belirli bir seviyenin üzerine çıkıldığı zaman, yüksek itki değerlerinde frekans değerlerinin arttığı gözlenmektedir.



Şekil 4.11 Dönen fan kanatlarının hızlanma ve yavaşlama verileri [5]

FAN KANAT TİTREŞİMİNİ AZALTMAYA YÖNELİK YAPILAN TESTLER

5.1 Motor Fan Kanatlarının Sökme ve Takma Adımları

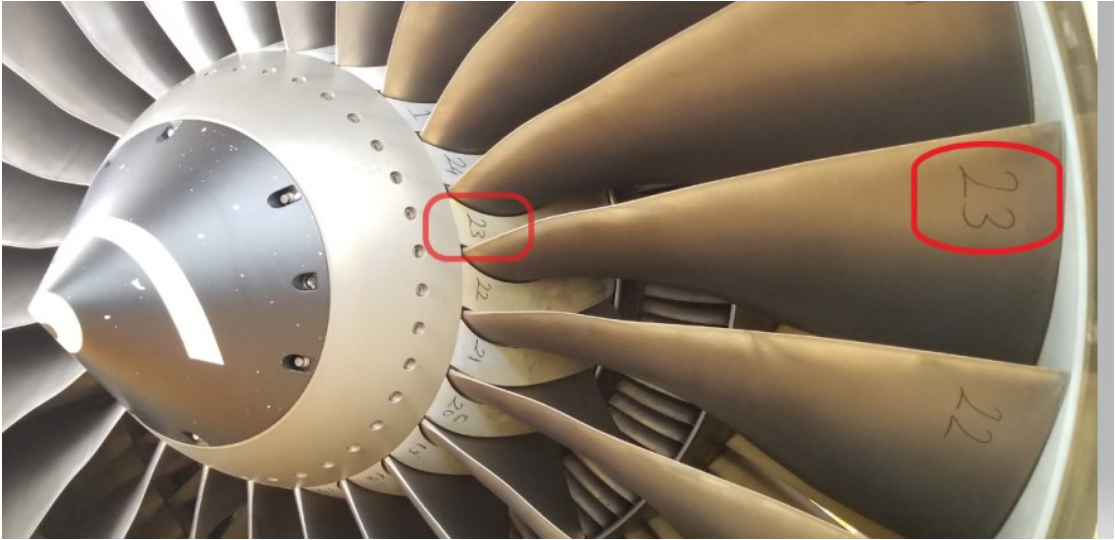
Uçak motorları havada ve yerde sürekli olarak takip edilmektedir. Bu takip işlemleri uçak operatörü, uçak imalatçısı ve motor üreticisi tarafından sürekli yapılmaktadır. Bu veriler son 69 adet uçuşa kadar saklanabilmekte ve sürekli incelenmektedir. Bu işlemin amacı, hangi uçuş anlarında, ne zaman ve hangi hava şartlarında olduğunun da inceleme esnasında dikkate alınması amacı ile yapılmaktadır. Uçuş işlemleri anında veya rutin bakımlar amacı ile hangara alına alınan uçak ve uçak motorları bakıma hazırlanır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 Uçuş sonrası hangara alınan uçak ve motor pozisyonu

Hazırlık işlemlerin de hertürlü detay malzemenin ve temizlik işlemlerinin yapılması önem arz eder. Bakım öncesi, uçak motorunda bulunan ECU (Engine Control Unit) sayesinde, uçak ana bilgisayarına iletilen veriler incelenir. Motor tipine göre titreşim limitleri aşıldığı durumda, sistem uyarı vermektedir. Bu tip acil durumlarda, AOG (Aircraft on Ground) kuralları uygulanır. Acil durumda, ivedi çözüm sürecine geçilir. Uçakta bulunan FADEC (Full Authority Digital Engine Control) sistemi, tüm kombinasyonları değerlendirdikten sonra pilotları yönlendirmektedir.

Manuel olarak söküm işlemlerinde, tüm malzemeler hazırlandıktan sonra, tüm fan kanatlarının numaralandırılması ve yerine aynen takılması önem arz eder. Eğer değişim gerekli ise fan kanatları çiftlerli olarak, pozisyonları karşılıklı olarak değişmek zorundadır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 Fan Kanatları Sökme Takma İşlemleri Öncesi markalama işlemleri

Pilot ana kumanda ECAM (Electronic Centralized Aircraft Monitor), ekranına düşen verilere göre, pilotlar gerekli işlemleri yapmaktadırlar

5.2 Titreşim Veri Akışları ve Değerlendirme Süreci

Uçak motorları uçuş esnasında üç ana veri ışığında alınan kaynaklar ile titreşim ölçümleri alınır. Bu veriler ışığında da çözüm adımları değerlendirilir ve uygulamaya konulur.

5.2.1 Ana Kumanda Ekran Verileri (ECAM)

Ana kumandaya gelen titreşim değerleri pilot tarafından kontrol edilmektedir. Bu ekran aynı zamanda bakım ve motor test işlemlerinde de kullanılmaktadır. Ekran üzerinde okunan değerler, uçak ve motor ilk sipariş sürecinde tüm bilgileri ve değerleri yüklenerek gelmektedir. Ölçüm kaynakları ve gösterge paneli, bu verilerin okunması için önemli bir araçtır (Şekil 5.3).

Bu tez çalışmasında, uçak motor fan kanat pozisyon tariflerinde, saat pozisyonları kullanılacaktır (Şekil 5.3). Bu yöntem ile hatalı veri girişleri veya uygulamalar önlenmektedir. Tüm işlemlerin ve işlem adımlarının aynı dil kullanılarak yapılması hedeflenmektedir.

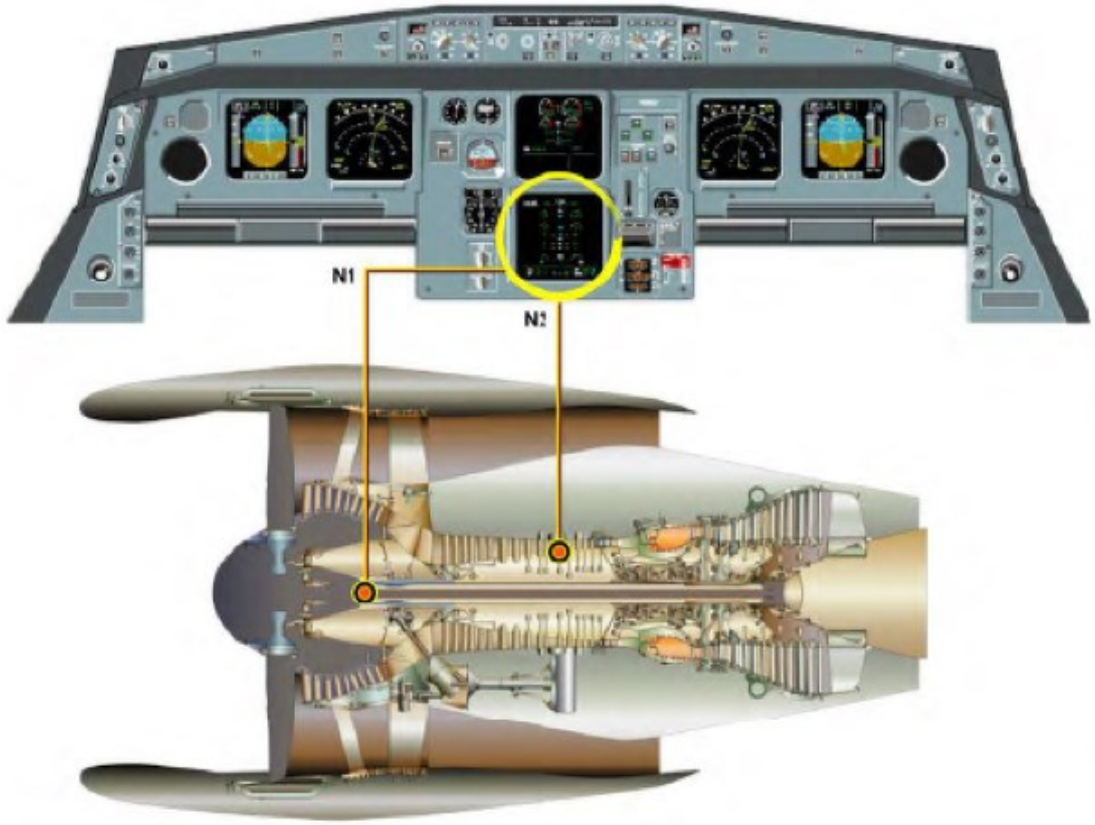
Titreşim kontrol sisteminde ki veriler değerlendirilerek, uçak motor ve tipine göre titreşimlerin limit içi veya dışı olduğu tespit edilerek, alınması gereken denge ağırlık, pasif kontrol sistem verileri kullanım kılavuzunda belirtilen hesaplamalar ışığında manuel veya elektronik bilgisayar hesap sonuçlarına göre balans ağırlık montaj işlemleri yapılarak pasif titreşim kontrol sistemi uygulanmaktadır.



Şekil 5.3 Saat Pozisyonu

Üretici firma tarafından uçak motor ilgili alanlarına konulan ivme, hız ve titreşim sensörleri vasıtası ile fan kanat titreşim değerleri, ECAM ekranına düşerek takip edilmektedir (Şekil 5.4). Limit dışı olan durumlarda yeşil olan titreşim değerleri kırmızı

renge dönmektedir. Yapısal test ve rakamsal veriler ışığında çözüm yöntemleri denenmektedir.



Şekil 5.4 Titreşim kontrol sistemi, N1: Fan kanat, N2: Fan bıçakları

Titreşim izleme ve ölçüm sistemleri uçak üzerinde her bir motor için ayrı ayrı yapılmaktadır. Bu ölçüm sistemleri, 4 ana üniteden ve sensör sistemlerinden meydana gelmektedir. Test ve ölçüm işlemlerinde, bu sensörlerden alınan veriler ışığında balans ağırlıkları konuşlandırılmaktadır.

Dört ana üniteden oluşan sistem;

- İki adet izleme sensörü : Piezo-elektrik ivme ölçer N1 yatağı titreşim sensörü ve kompresör arka çerçevesi, CRF titreşim sensörü
- İki adet takometre, N1 ve N2 hız sensörleri
- Motor ara birim ve titreşim izleme ünitesi (EIVMU)
- Uzak veri dönüştürücü (RCC)

Bu ölçüm sistemlerinden gelen veriler, ECAM motor ekranına yansımaktadır (Şekil 5.5). VIB N1 değerleri test aşamasında alınacak ve değerlendirilecek verilerdir.



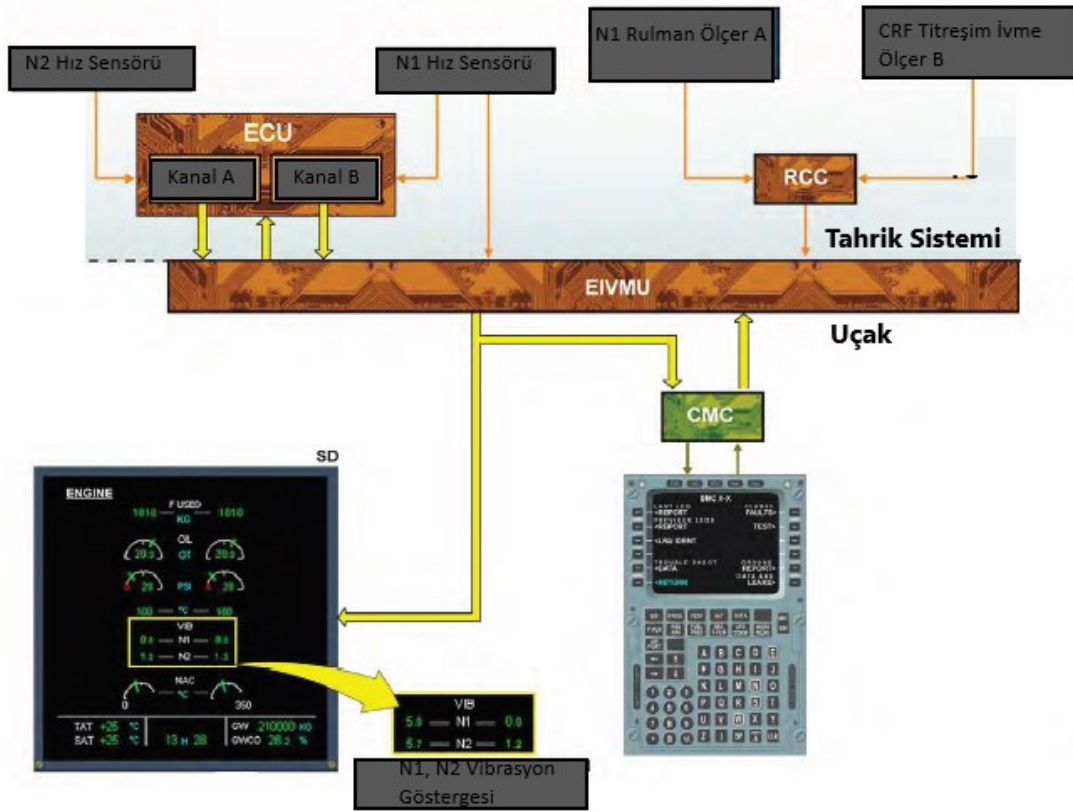
Şekil 5.5 ECAM motor titreşim değerleri ekranı

Test esnasında, titreşim limitlerinin üzerine çıkan değerlerde ECAM ekranı, VIB N1 değeri kırmızı renk ile gösterilmektedir.

5.2.1.1 N1 ve CRF Titreşim Sensörleri Çalışma Prensipleri

N1 ve CRF ivme ölçer sensörleri takıldıkları konumların etrafında ki titreşimleri analog giriş olarak algılar. Bu zayıf sinyalleri algılayarak yükseltir ve EIVMU birimine iletir. EIVMU tarafından analog girdiler değerlendirilir ve dijital çıkış sinyali olarak uçuş bilgi ekranına gönderir. Fan kanat titreşim sensörü N1 rulman ivmeölçer, A karterine bağlanarak yatak muhafazasına civatalanmıştır. N1 yataklı titreşim ölçer toplayıcı, elektrik kablosu ve bir bağlantı elemanı ile fan kanat titreşimlerini izlemek için

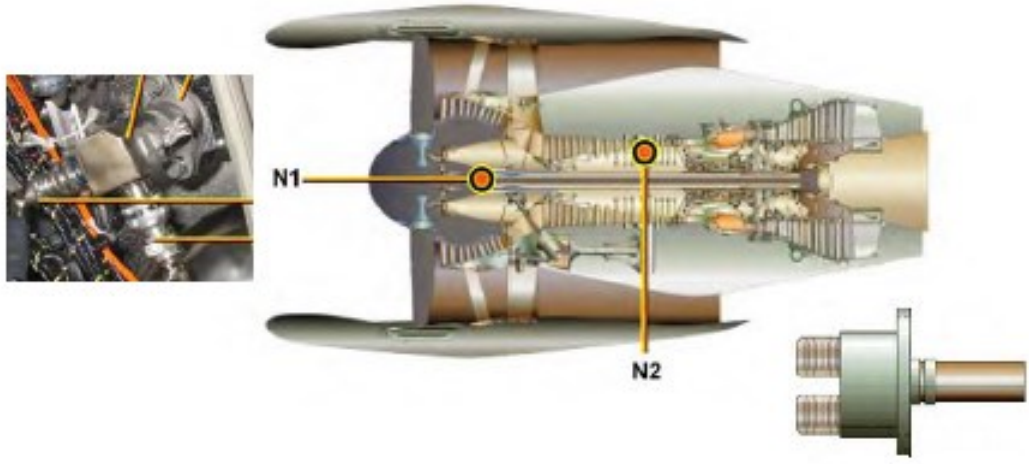
tasarlanmıştır. CRF ivme ölçer toplayıcı, bağlantı kablosu ve konnektör ile çekirdek motoru ve alçak basınç kompresörünün titreşimlerini izler (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 Titreşim kontrol sistem şeması ve çalışma prensibi

5.2.1.2 N1 ve N2 Hız Sensörleri

Alçak ve yüksek basınç rotorlarının, dönme gruplarının, dönme hızlarını algılamaktadır. N1 hız sensörü için EIVMU'dan gelen değerler kullanılır. ECU A ve B kanallarından gelen değerleri kullanmaktadır. N1 hız sensörleri saat iki yönünde fan kanat çerçevesinin içine monte edilmiştir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 N1 ve N2 sensörleri

5.2.1.3 Motor Ara Birim Ve Titreşim İzleme Ünitesi (EIVMU)

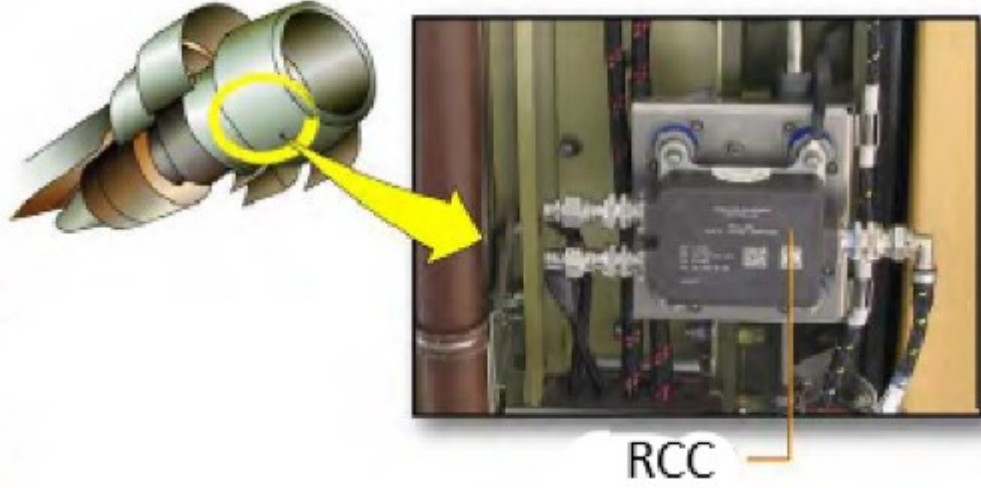
EIVMU tahrik sistemi ile uçak arasında bağlantı kurarak, algılanan analog verileri uçuş kumanda panellerine aktarmakta ve bu bilgilerin pilot tarafından değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Titreşimlerin alınması ve değerlendirilmesi için aşağıda belirtilen sinyal adımları alınmaktadır;

- ECU'dan alınan N1 ve N2 hız ölçüm sinyalleri
- N1 hız sensöründen üç adet analog sinyal almaktadır; N1 rulman titreşim değerleri (Kanal A), RCC ve CRF titreşim sensörleri (Kanal B)
- EIVMU, CMC ve gelen çıktıları alır ve dijital sinyale dönüştürür. Dönüştürdüğü dijital sinyalleri, EIVMU tarafından, Display Management Computer (DMC) ekranına dönüştürerek pilotların görmesini sağlamaktadır.

5.2.1.4 Uzak Veri Dönüştürücü

RCC, EIVMU ile N1 CRF ivme ölçerleri ile arayüz oluşturan bir ölçüm, dönüşüm ve motor cihazıdır. Başlıca görevi, piezo tipi sinyalleri koşullandırarak EIVMU ünitesine göndermektir. Dönüştürücü, fan muhafazasında saat 5 konumundadır (Şekil 5.8).



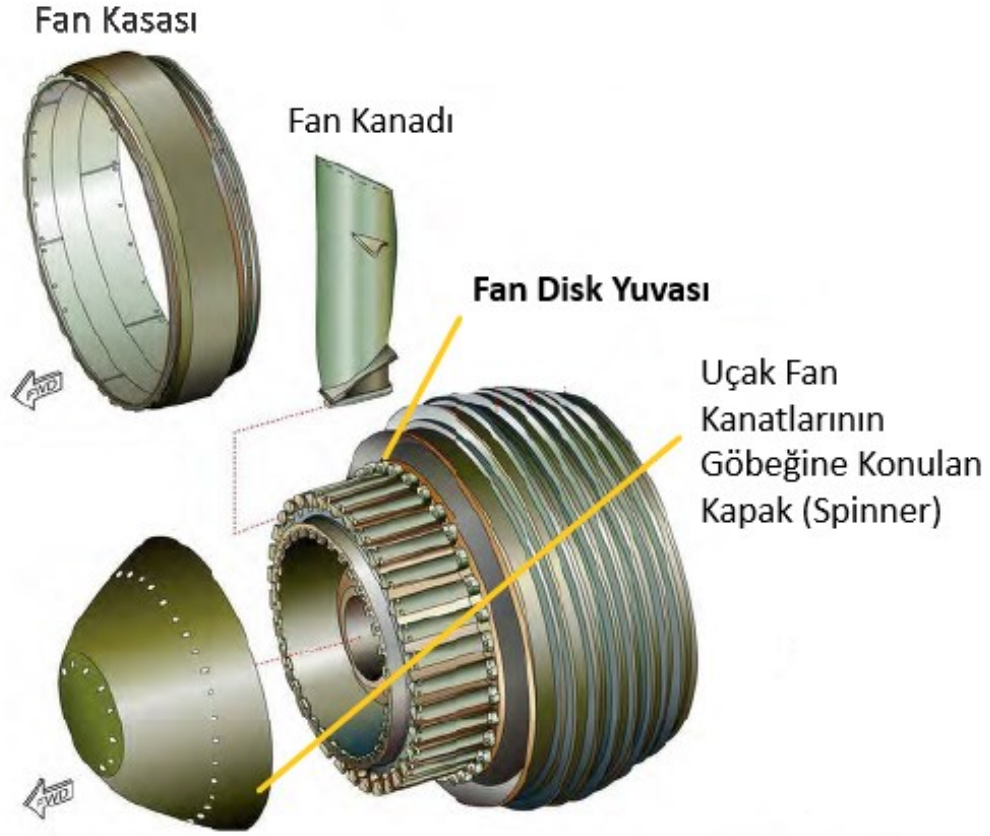
Şekil 5.8 RCC ve konumu

5.2.2 Fan Kanat Dengelemesi ve Titreşim Seviyeleri

Titreşim sistem düzenekleri sayesinde, uçak kontrol ekranından titreşim verileri gözlenmektedir. Bu veriler gerek uçuş esnasında, gerek bakım sonrası test işlemlerinde alınabilmekte ve hafızada depolanabilmektedir. ECU'dan alınan veriler net bir şekilde gözlemlendikten sonra limit dışı bir durumun olması durumunda, titreşimin limit içine alınması için gerekli çalışmalar yapılmaya başlanır. Montaj esnasında gerekli adımlar kesinlikle takip edilmelidir (Şekil 5.9)

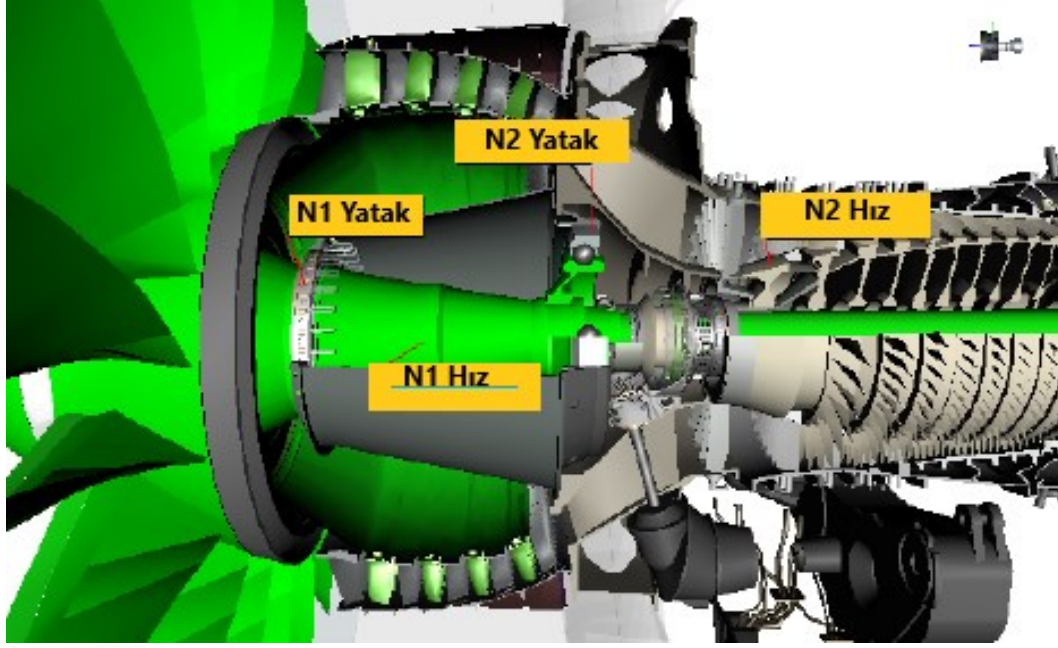
Fan kanatları titreşimlerinin limit içine alınma işlemi (Fan Trim Balance), fan kanat titreşimlerinin azaltılması olarak tanımlanmaktadır.

İki adet analog ivme ölçer verileri RCC tarafından alınır. Dönüştürme işlemi, voltaj dönüştürücüden geçerek EIVMU'ya iletilir. EIVMU tarafından da ekran da gösterge panelindeki değerlere dönüştürülmektedir. MCDU ünitesinden seçim ile EIVMU'dan da görüntü alınabilmektedir.



Şekil 5.9 Fan kanatlarının genel montaj şeması

N1 hız sensörleri, fan miline montajı yapılmış bir sensör halkası içermektedir. Bu sensör halkası 38 dişten meydana gelmektedir. Bu dişler, bir faz olarak kullanılarak, dairesel fan disk üzerinde açısal konum belirleme amacı ile kullanılmaktadır. EIVMU tarafından fan kanat titreşimlerinin düzenlenmesi için, sensör halkasında meydana gelen, merkez kaç kuvvet yönündeki değişim mesafeleri, EIVMU ekranında denge ağırlıkları olarak tespit edilmektedir. N1 rulman ölçer, aynı zamanda fan kanat titreşimlerinin dengesi için de kullanılmaktadır.



Şekil 5.10 N1 Yatak ve sensör halkası

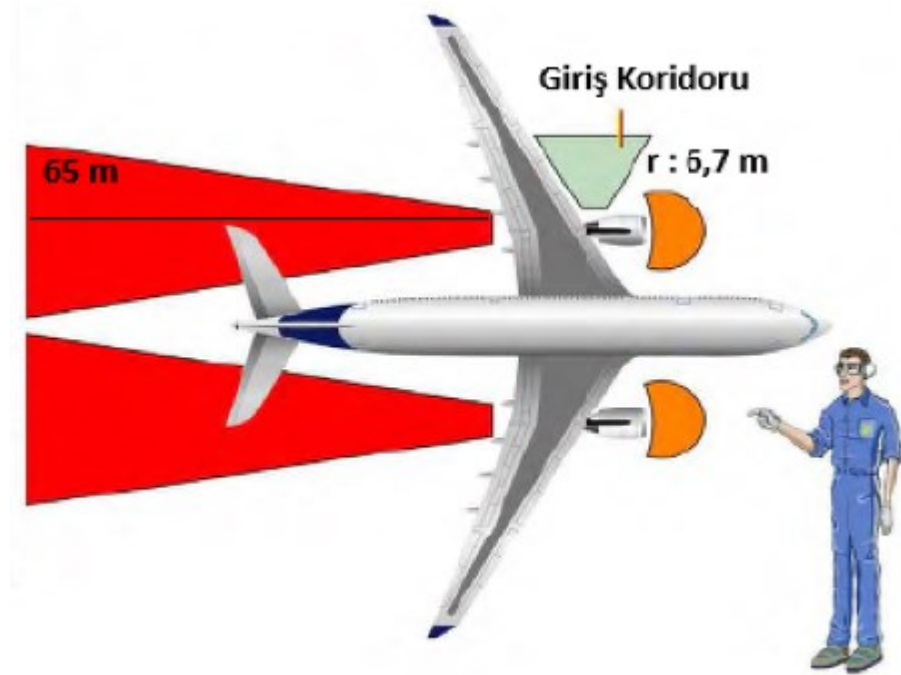
Tahrik sistemi sebebi ile oluşan, uçak motorlarının bakım sonrası çalıştırma ve test işlemleri dahil, veriler EIVMU aracılığı ile ECAM'a gelir. ECAM'a gelen değerler limit dışı olması durumunda, kırmızı renk ile gösterilmektedir. Bu andan itibaren, titreşim değerleri tekrar incelenerek emin olunur. ECAM Motor göstergesine gelen veriler, EIVMU'dan saniyede inc birim yer değiştirme, titreşim verileri olarak "cockpit UNITS" baremine dönüştürülür. 1mils = 1/1000 Inch, 1 mils = 1Unit kabul edilmiştir. Barem aralığı 0-10 arasındadır. Daha önceden uçak motor eşleşmesi yapılarak, tüm ayarları yapılan, titreşim değerleri sensörler sayesinde ana bilgisayar ile kontrol edilir. Bu ana bilgisayara gelen veriler, limit dışı çıkması durumunda farklı renklerle kodlanmış ve kokpit ortamında ekranda rahatlıkla görülebilmektedir. N1, N2 limit değerleri, N1 bilezik sensör değerleri, CRF tarafından alınan değerler, titreşim birimine çevrilerek ECAM ekranında gözükmemektedir (Şekil 5.10).

- Yeşil: Normal değer (Titreşim değeri ≤ 5.7 Units)
- Kırmızı: Yüksek değer (Titreşim değeri ≥ 5.7 Units)

5.3 Titreşimin Azaltılmasına Yönelik Test İşlemleri

Motor titreşim değerleri ölçüm sayfasından (ECAM) okunan değerler ve uçak bilgi bankasından alınan değerler gözönünde bulundurularak yapılır. Motor ara birim ve

titreşim izleme ünitesi (EIVMU) bu değerleri depolar ve ECAM'a iletir. AMM ilgili bölüme gidilerek, uçak bakım manuelinde yapılması gereken ve alınması gereken önlemleri sırası ile ifade etmektedir ve anlatmaktadır. Uçak bakım literatüründe en önemli adım, yapılanın yazılması, yazılanın yapılmasıdır. Her zaman öncelikli olan diğer madde Şekil 5.11, güvenlik şartlarının, iş güvenliği adımlarının sağlanması gelmektedir. Kesinlikle güvenlik talimatların uyulması birinci önceliktir. Can ve mal güvenliği için en önemli adımlardan bir tanesidir.



Şekil 5.11 Motor test güvenlik mesafeleri

AMM referansları baz alınarak bu çalışmamızda CF6-80E1A3 uçak motor N1 titreşimlerinin azaltılması ve test işlemleri yapılacaktır.

5.3.1 Fan Kanatları Sökme ve Toplama İşlemleri

Uçak motorlarının yetkili bakım kuruluşuna gelmesi ile, gerekli hazırlıklar yapılır. Bu aşamada en önemli unsur, sökülen her bir parçanın düzenli bir şekilde faal alanlarında bekletilmesi ve muhafaza edilmesidir. Bu tez çalışmasında, fan kanatlarına odaklanılmıştır fakat motor tamamen bir bütün teşkil ettiği için oluşabilecek bir ufak parçanın eksikliği titreşim azaltmaya yönelik test işlemlerinin hatalı sonuçlanmasına ve çözümlerin farklı zararlar vermesine sebebiyet verebilir. Fan kanatları sökme takma

işlemleri öncesi markalama işlemleri itinalı bir şekilde yapılmıştır (Şekil 5.12). Fan kanat sökme işlemleri biten fan disk, gözle kontrol ve detaylı temizlik yapılarak tekrar hazır hale getirilir (Şekil 5.12).



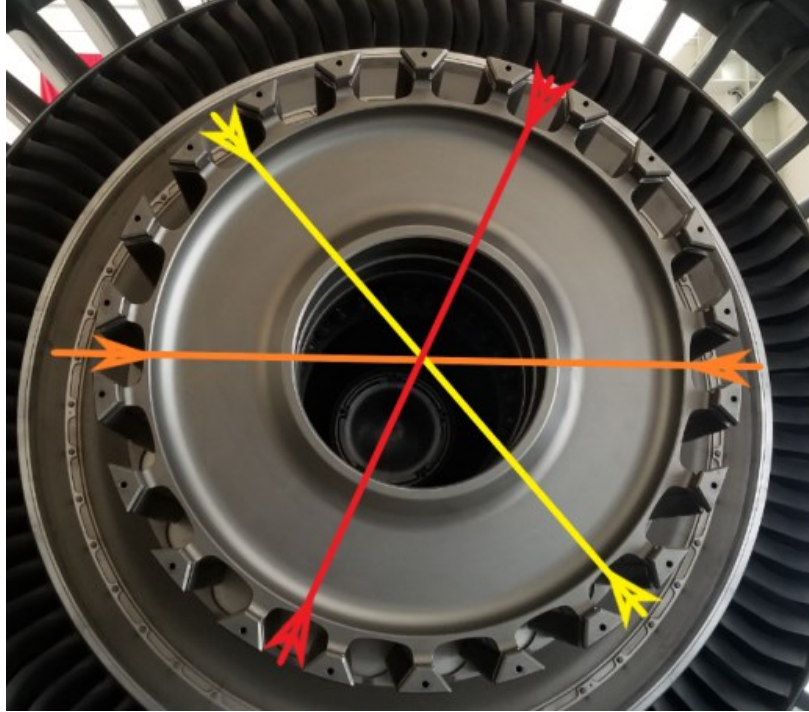
Şekil 5.12 Fan kanatları sökülmiş olan disk, fan kanat yuvası

Fan kanat sayıları çift sayılardan oluşmaktadır, bunun en önemli sebebi, aynı merkez etrafında dönen bir yapı olması sebebi ile dönme sonucu oluşacak merkezkaç kuvvetinin maksimum derecede dengelenmesi ve titreşimlerin engellenmesidir. Bu çalışmamız da özellikle, fan kanatlarının ağırlığına dayalı, moment kuvvet kolu ölçüm cihazının alımı büyük kolaylık sağlamıştır. Fan kanatları çiftler halinde bulundurulmak zorundadır. En önemli parametre olan merkez kaç kuvvet değerlerinin dengelenmesi için, fan kanatlarının çiftler halinde karşılıklı montaj yapılması gerekmektedir.

5.3.1.1 Fan Kanat Çiftleri ve Montaj Şeması

Fan kanatlarının her birinin kendi ağırlı ve moment kuvvet kolu değerleri ve hangi noktada olduğuna dair değerleri ölçülmektedir. Bu ölçümün yapılmasının amacı, teknoloji ne kadar ilerde olsa dahi imalat aşamasında tam bir homojen fan kanat yapısı elde edilememektedir. Homojen yapı olmaması sebebi ile ağırlık dağılımı farklı olmaktadır. Bu ağırlık farklarını, karşılıklı çift fan kanatları için dengeleme işlemi

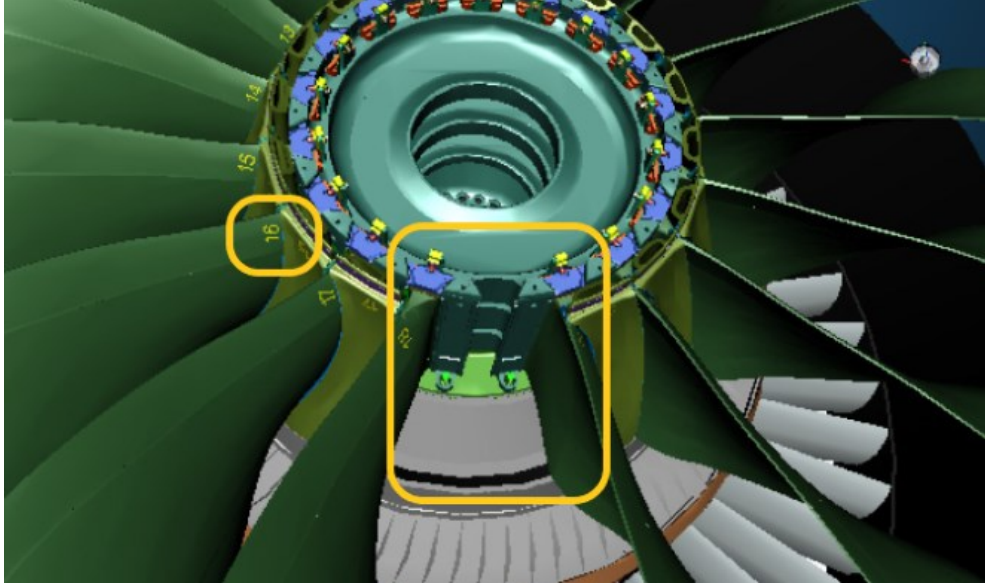
yapılmaktadır (Şekil 5.13). Gerek ağırlık olarak, gerek moment kuvvet kol parametrelili en yakın olan fan kanat çiftleri oluşturulur. Elde edilen bu parametre değerleri ile fan kanatları fan diskine yerleştirilir ve montaj işlemleri yapılır.



Şekil 5.13 Fan disk üzerinde, fan kanat çiftlerinin konumları

Montaj işlemleri esnasında yetkili personeller tarafından azami dikkat ve uçak bakım manueli ve motor bakım manueli adım adım izlenir. En ufak bir parçanın unutulmaması bu aşamda büyük önem arz etmektedir. Fan kanatları söküm öncesi numaralanmış (Şekil 5.14), montaj aşamasında da aynı titizlik bakım kılavuzuna göre uygulanmaktadır.

Bakım kılavuzunda montaj sırası, montaj esnasında kullanılması gereken ekipman ve test cihazlarının ürün kodları, sıkma ve sökme döndürme kuvvet değerleri detaylı bir şekilde verilmektedir. Sökme ve takma işleminde kullanılan ekipmanların, doğru değeri sıkıldığına dair emin olunması gereken diğer bir maddedir. Tüm sıkma, döndürme (torklama) işleminde kullanılan takımlar kesinlikle kalibrasyonlu olmalıdır. Kalibrasyonsuz cihazın kullanılması yasaktır. Bu durumun ilgili denetçiler tarafından tespit edilmesi durumunda, bakım kuruluşunun yetki askıya alınır. Gerekli şartları yerine getirene kadar, bu durumun bir daha olmayacağına dair teminat verene kadar bakım yapamaz.

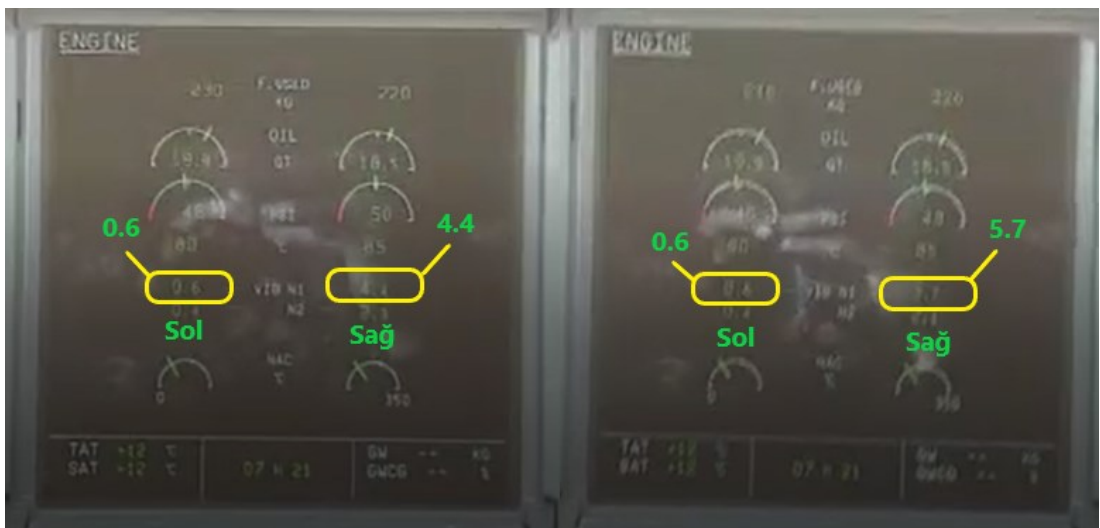


Şekil 5.14 Fan kanat disk veya platform üzerinde dizim sırası ve yeri

5.4 Fan Kanat Titreşimlerinin Azaltılması ve Testleri

Bu uygulamada, uçak uçuş esnasında toplanan geçmiş verilerde değerlendirilir ve yetkili bakım kuruluşuna gelen uçak motoru, montaj sonrası yapılması gereken titreşim test verileri değerlendirilmesine alınır.

Motor ara birim ve titreşim izleme ünitesi (EIVMU), uçak geçmişinde olan verileri depolama biriminden çekerek ekranda görmemize yardımcı olur (Şekil 5.15).



Şekil 5.15 ECAM titreşim değerleri

Çok amaçlı kullanılan bilgi ekranından (MCDU) titreşim verileri alınmaktadır. Bu titreşim verilerinin alınma prensibi aşağıda belirtilmiştir.

- U : Genlik
- A : Faz açısı
- N1 : Fan kanat mil hızı
- W : Denge ağırlıkları
- P00 : Denge ağırlığına denk gelen özel vida kodları
- R₁ : Fan kanat disk kapağı denge ağırlık delik montaj uzunluğu

Belirtilen veriler baz alınarak, etki ağırlığı sensörlerden alınan değerler ışığında ECAM göstergesine yansıtılmaktadır. ECAM göstergesine, EIVMU tarafından yüklenen (5.1) denklemi ile hızlı bir şekilde hesap yapılabilmekte, çıktı olarak ECAM ekranında görülebilmektedir.

$$W_{n+1} = W_n * (U_0 / R_1) \quad (5.1)$$

Uçak sektörün de kullanılan birimler SI birim sistemine göre türetilmiş birimlerdir (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1 ECAM ekran hesaplama verileri

Sembol	Açıklama	Birim	Kokpit Ekran Değer
N1	Fan Kanat Mil Hızı	rpm	%
A	Faz Açısı	Derece	Derece
U	Genlik	Mils	Mils
W	Denge ağırlığı	gr	P00

Bir çemberin açısal ve yarıçap değeri verilerek tam olarak konumu belirlenebilmektedir. Uçak sektöründe hız limitlerinin fazla olması, hesaplamaların daha hassas ve tolerans aralığının daha dar olması gerekliliğini doğmuştur. Buna istinaden çembersel bir geometrik şeklin, yarıçap ile tarifinde miliradyan kullanılmaktadır (Çizelge 5.2). Bu birim ile daha hassas konum tarifi hedeflenmektedir. Özellikle miliradyan, askeri alanda da kullanılmaktadır. Top, füze atışlarında 360 ° ile tarif edilen ölçü 6.400 mils ile tariflenmektedir (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2 Radyan dönüşüm bilgileri

1 radian (rad)	$1 \text{ rad} \times 180 / \pi$	57.2958 °
1 radian (rad)	$1 \text{ rad} \times 1.0000$	1.0000 miliradian (mils)

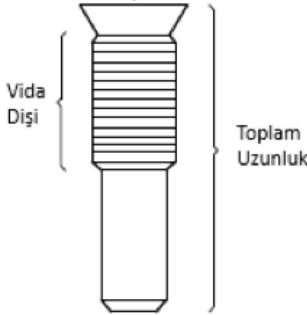
Test sürecinde maksimum % 85 itki kuvveti ile çalıştırılan uçak motoru titreşim değerleri baz alınacak ve bu değerlere göre çözüm üretilecektir. Titreşim değerlendirme ünitelerine yüklenen veriler sonucunda, MCDU ekranında hangi denge değerinin, hangi açıya denk gelen delik pozisyonuna takılması belirtilmektedir. Bu aşamada, dikkat edilmesi gereken durum, doğru ürün kodunun seçilmesi, doğru konuma takılması ve doğru sıkma değeri ile montaj işlemlerinin yapılması gerekmektedir (Çizelge 5.3).

Çizelge 5.3 MCDU tarafından gösterilen titreşim çözümleri

MCDU GÖSTERGESİ				DENGE VİDASI			
TEST NO	N1 FAN KANAT HIZI (RPM)	GENLİK (U)	FAZ AÇISI (A)	PO ÜRÜN KODU		DİSK BALANS ETKİ AĞIRLIĞI (GRAM)	DİSK KORUYUCU DELİK LOKASYONU
	%	MILS	DERECE	KALDIRILACAK	TAKILACAK		
1	85	4.2	80°	P02 P02	P06 P06	24.0 24.0 48.0	15 16
2	85	3.2	169°	P06 P06 P01 P02	P02 P02 P02 P05 P03	0.0 0.0 6.0 24.0 6.0 36.0	15 16 19 20 21
3	85	1.2	115°				

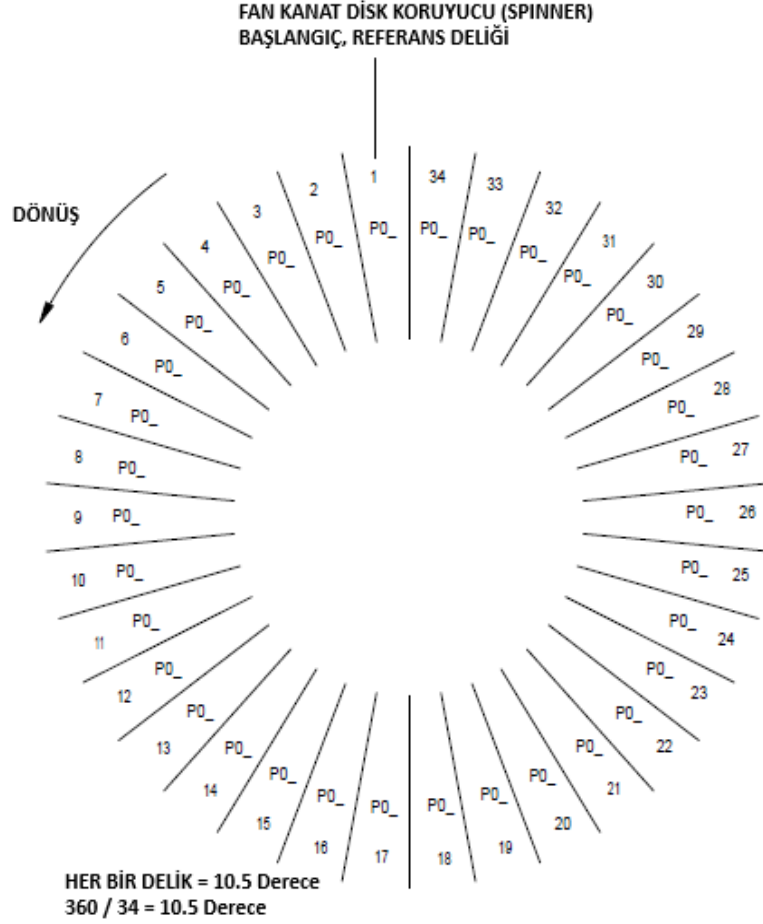
Bu aşamada yapılacak hatalar, gerek maddi kayıplara gerekse maddi hasarlara sebebiyet verebilir. Kritik durumlarda ise havada karşılaşılabilecek bir durum felakete kapı aralayabilir. Sökülen parçaların tek tek düzenli alınması ve otoritenin belirlediği yetkili personellerce, bakım kılavuzuna göre yapılmaktadır.

Çizelge 5.4 Denge vidası bilgileri

DENGİ VİDASI					
Denge Vidası Ürün Kodu	P0 ÜRÜN KODU	Toplam Uzunluk		TERAZİ AĞIRLIĞI (GRAM)	DİSK BALANS ETKİ AĞIRLIĞI (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

MCDU’da verilen değerler, kontrol edilerek Çizelge 5.4’ten seçilir. Personel bu kontrolleri hata oranını sıfıra indirmek için yapmaktadır.

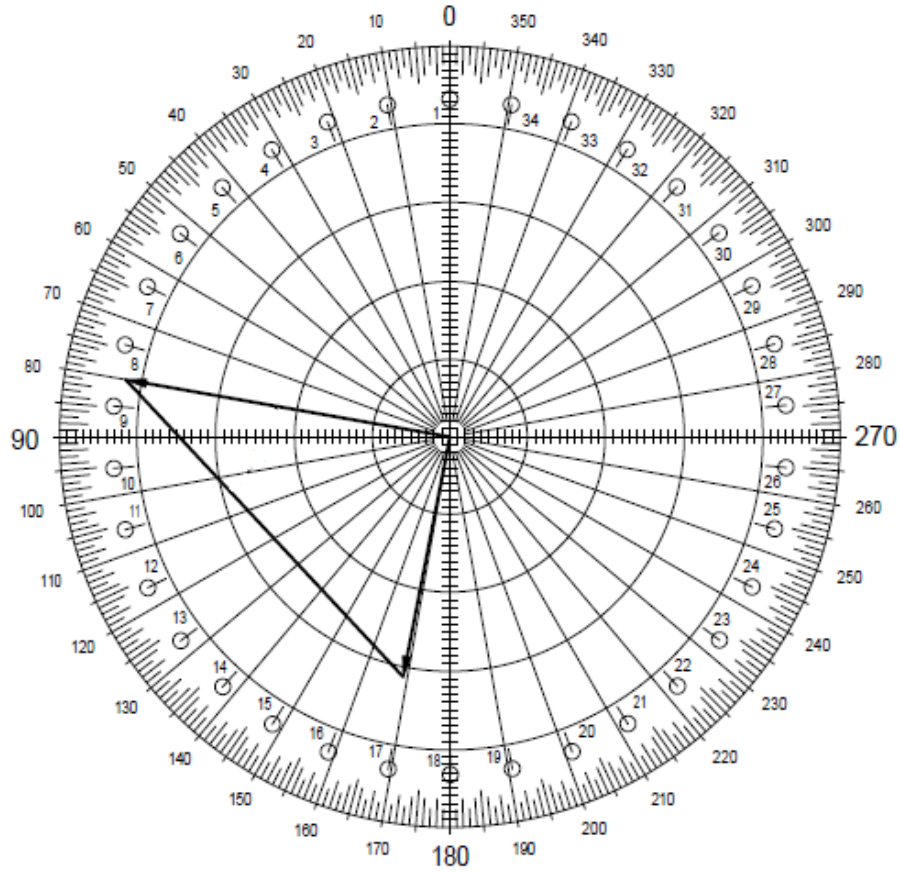
Bu bilgiler ışığında, fan disk koruyucu aç haritası referans alınarak Şekil 5.6, denge ağırlıklarının yerleri netleştirilmelidir. Bu aşamda motor fan kanat dönüş yönüne dikkat edilmelidir.



Şekil 5.16 Fan disk koruyucu aç haritası

Fan disk koruyucu aç haritası detaylı bir şekilde incelendikten sonra, MCDU’da verilen titreşim çözüm parametreleri Çizelge 5.4, düzenli bir şekilde kontrol edildikten sonra Şekil 5.17, konum belirleme işlemleri yapılır. Bu aşamada fan disk koruyucu balans ağırlık montaj noktaları, haritadan net bir şekilde okunmalı ve belirlenmelidir. MCDU, çok amaçlı kullanılan gösterge değerleri okunurken, balans ağırlık ürün kodlarına dikkat edilmelidir. P01 ve/veya P02 seçilmesi muhtemel çözümleri tamamen etkileyecek ve çalışmanın istenilen titreşim azaltma hedefini vermeyecektir. Ürün kodları talep edilen depodan gelen paket üzerinde de detaylı bir şekilde kontrol edilmelidir. Her türlü adımda, ara basamaklarda hata sayısının artacağı hiçbir zaman unutulmamalıdır. Gelen ürünlerin ürün kodları ve sağlamlığı gözle kontrol edildikten sonra, fan disk koruyucuya montaj işlem adımına geçilebilir. Fan disk koruyucu balans ağırlık montaj noktaları doğru bir şekilde belirlendikten sonra, montaj işlemleri yapılmaktadır. Montaj

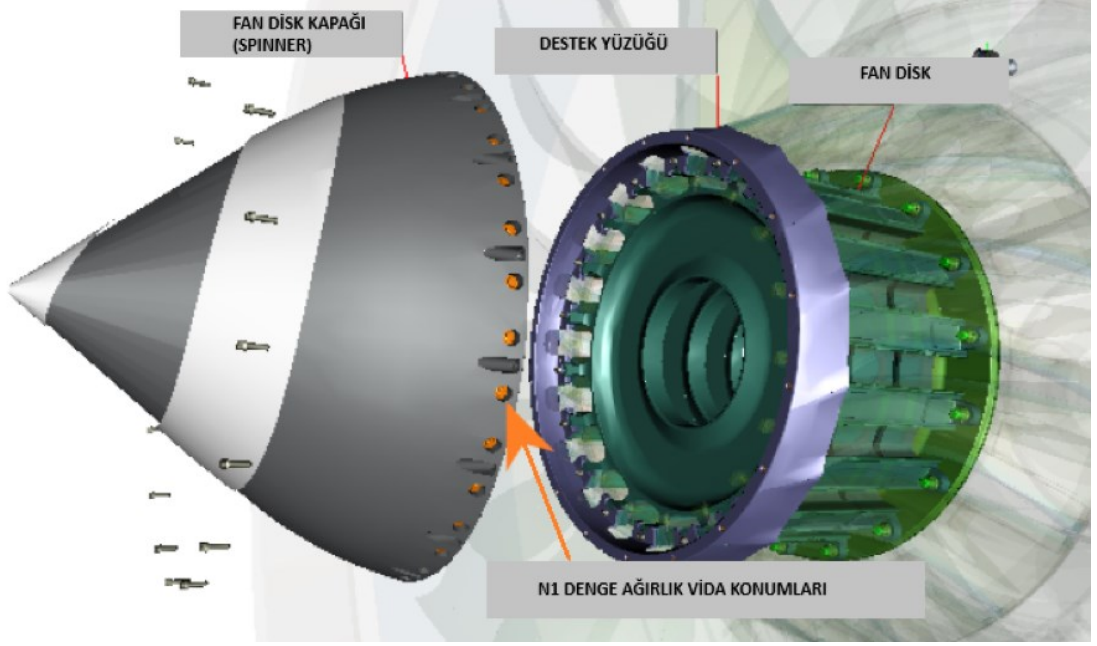
işlemi Şekil 5.17, N1 milinin fan kanatları ile dönmesi sonucu oluşan titreşime istinaden doğru konumlandırılarak takılmalıdır.



Şekil 5.17 Fan disk koruyucu denge ağırlık montaj haritası

N1 denge ağırlık vida konumları (Şekil 5.18), bakım kılavuzunda belirtilen değerler ile takıldıktan sonra gözle kontrol edilmelidir. Fan disk kapağı , titreşim balans ağırlıkları takıldıktan sonra yapılması gerekmektedir. Bu adımların hepsinde referans nokta, bakım manuel kitabı ve önceden sökülen ürünün aynen birebir yerine tekrar aynı değerler ile montaj işlemlerinin yapılmalıdır.

Fan disk takma işlemleri, daha önceden eşleştirilmiş fan kanat çiftleri şeklinde montajlama işlemi yapıldıktan sonra (Şekil 5.13), fan kanat çiftlerinin konumları sabitleme işleminde, 75-100 lbf.in (1lbf.in = 0.113 Nm) sıkma takımı (tork metre) kullanılmaktadır Çizelge 5.6, genel birim dönüşümleri tablosunda eşitlik ifade edilmiştir.



Şekil 5.18 N1 Denge ağırlık vida konumları

ECAM'dan alınan titreşim değerlerine yönelik çözümler N1 denge ağırlık vida konumlarına göre montaj işlemleri yapılır. Fan kanatları fan disk yuvasına çiftlerli ve karşılıklı olarak yerleştirilir. Destek yüzüğü montajı yapıldıktan sonra fan disk kapağı takılır. Tüm malzemelerin eksiksiz bir şekilde montajının yapıldığından emin olduktan sonra, gerekli döndürme kuvveti değerleri ile vida ve somunlar sıkılır.



Şekil 5.19 Fan disk üzerinde fan kanat yuvaları

Test ortamında direkt kullanılan fan disk Şekil 5.18 detaylı bir şekilde görülmektedir. Bu alanın çok temiz olması, tozdan arındırılmış ve kesinlikle ve kesinlikle yabancı madde olmaması gerekmektedir. Uçak parçalarının montajı esnasında FOD denilen, bakıma risk oluşturabilecek, bakım sonrası sorun teşkil edecek her türlü yabancı istenmeyen ürünlere tedbir almak zorunludur.

Çizelge 5.5 Uçak bakım kılavuzu tarafından verilen referans değerler [24]

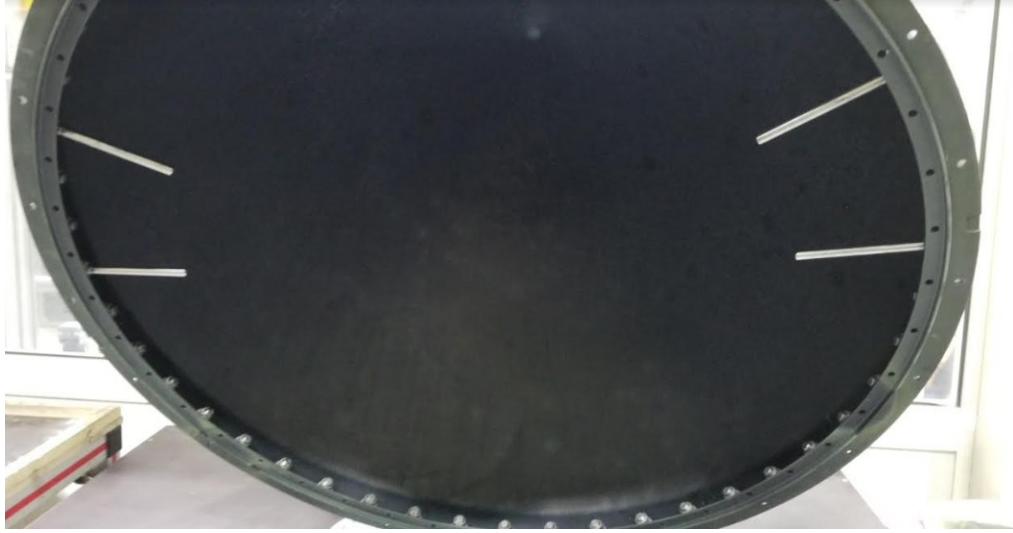
N1 Titreşim Değerleri (Units)	Yapılması Gereken İşlem, Bakım Kartı Gereği (71-00-00-750-806-A - Ground Trim Balance)
≥ 5.7	Balans yapılmalı
3.0 units (3 mils)	İlk aşamada önerilen seviye
2.5 units (3 mils)	İşlem tamamlandıktan sonra hedef seviye

Uygun şartlar altında toplanmayan ürünler sebebi ile referans titreşim sınır değerleri farklılık gösterecektir (Şekil 5.5).

Çizelge 5.6 Birim dönüşümleri

Birim İfadesi	Kullanılan Birim	Alternatif Birim
Döndürme Kuvveti	1 lbf.in	0.113 Nm

Titreşimin, limit değerlerin dışında olması durumunda Çizelge 5.5, sensörler ve uçak bilgisayar çıktılarına göre vidalı denge ağırlıkları Şekil 5.18, açılma nokta tarif prosedürüne göre itinalı bir şekilde, fan disk kapağına (spinner) takılır.



Şekil 5.20 N1 Denge ağırlık vida montaj hali

Fabrika çıkışlı olan denge ağırlıklarına Şekil 5.21, dokunulmaması ve konumunun bozulmaması gerekmektedir. Motor üzerindeki her ekipmanın, özellikle dönen aksamlardaki Çizelge 5.7, dönme sebebi ile oluşturabilecekleri etki değerleri, bir çok parametreyi değiştirir nitelikte olmaktadır.

Çizelge 5.7 İzin verilen maksimum mil hızları [25]

Motor Dönen Aksam	Motor Gücü	Dönme Değeri
Alçak Basınç Mili (N1)	% 115.5	3835 rpm
Yüksek Basınç Mili (N2)	% 113	11105

Denge ağırlıklarının Çizelge 5.4 buradaki ana görevi, fabrika çıkış işlemlerinden sonra, fan disk yuvası (spinner) için denge ayarlama işlemidir.



Şekil 5.21 N1 Denge ağırlığı fabrika çıkış

Bu ağırlıklar, bakım kuruluşu tarafından gerekli görülmedikçe değiştirilmemektedir. Bakım kuruluşları titreşimleri azaltmak için yapılan test sonuçlarına istinaden, pasif sönümleme yöntemi kriter alınarak, ayarlanmış kütleli titreşim sönümleyiciler kullanılmaktadır. Denge vidaları olarak ifade edilen Şekil 5.20, ayarlanmış kütleli titreşim sönümleyiciler, testlerde kullanılmıştır.



Şekil 5.22 Test işlemleri sonucu alınan ECAM değerleri

Test işlemleri ve adımları esnasında Şekil 5.23, gerekli tüm teknik ve idari tedbirler alınmış ve uygulamanın başarı ile sonuçlanması sağlanmıştır.



Şekil 5.23 Test aşamaları

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, uçak motorlarında, fan kanatları sebebi ile meydana gelen titreşim değerlerinin azaltılmasına yönelik bir test çalışması yapılmıştır. Titreşim azaltma işlemleri, sönümlemenin yapılacağı kullanım alanlarına ve amaca göre farklılıklar göstermektedir. Pasif, yarı aktif ve aktif sönümleme sistemlerin verimli bir şekilde kullanılabilmesi için uygulama alanlarının, fiziki şartlar anlamında uygun olması gerekmektedir. Motor fan kanat bölgesinin karışık bir fiziki yapıya sahip olması, eksenel merkezde ortalama 5.000 d/d olarak dönen fan kanatlarının, aktif bir sistemle kontrol edilebilirliğinin zorluğu sebebi ile pasif titreşim yutucular tercih edilmekte ve kullanılmaktadır.

Motor fan kanatları, ağırlıkları eşit olan çiftler halinde, motor fan diskine yerleştirilmektedir. Çalışmamızın önemli noktalarından biri, fan kanatlarının ve ona bağlı parçaların düzenli ve sistemli bir şekilde montajıdır. Bu aşamada, hata oranını sıfıra indirmek için, motordan sökülen fan kanatları için kullanılan, fan kanat sehpaları, silinmez bir şekilde alüminyum plakalar ile markalanmış ve sıralanmıştır. Bu sayede, fan kanatlarının yanlış dizilimi önlenmiş ve hesapta olmayan, istenmeyen titreşimlerin önüne geçilmiştir. Bu işlemin bir diğer kazanımı ise fan kanatları dizilen motorun, direkt motor test işlemlerine alınması, oluşabilecek dengesizliklerin uçuş öncesinde farkedilmesi ve bakım kılavuzuna göre zorunlu olan limit değerlerine en az test sayısı ile ulaşılmasıdır.

Uçak ve motor bakımı, ekip halinde yapılan işlemler bütünüdür. Herhangi bir bakım ve tamirde, işlerin bir sonraki ekibe eksiksiz bir şekilde devir edilmesi, azami derece de önem arz eder. Eksik veya fazla takılan bir malzeme tüm bakım zincirini etkileyebilir, istenmeyen sonuçlar doğurabilmektedir. Bu nedenle, numara ile markalanan motor kanat sehpaları, bir sonra gelen ekip için de klavuz görevi görmüş, hataları azaltmıştır. Bu sayede, zaman kazanılmış, sökülen motor parçaları detaylı bir şekilde temizlendikten sonra, tam ve eksiksiz bir şekilde yerlerine konulmasının önem farkındalığı arttırılmış, hata zinciri azaltılmıştır. Önemli bir diğer durum ise yabancı malzemelerin, sisteme dahil edilmesi engellenmiştir.

Doğru bir şekilde bakımı ve montajı yapılan motor çalıştırılarak, test işlemlerine sokulmuştur. Test işlemlerinden sonra, titreşim limitleri dışına çıktığı tespit edilen ticari yolcu uçak motorunda titreşim azaltıcı olarak, fiziki uygulama alanına en ideal olan pasif sönümleyici denge vidaları kullanılmıştır.

Yapılan ilk test işleminde motor titreşim değerleri sol motor 0.6 unit, sağ motor 4.4 unit olarak, ikinci test işlemlerinde de sol motor 0.6 unit, sağ motor 5.7 unit olarak ölçülmüştür. Denge vidalarının, fan disk koruyucu açılı haritasının tekrar okunması ve sökülen her bir fan kanadının numaralandırılarak sökülüp tekrar yerine takılması neticesinde sol motor 0.7 unit, sağ motor 1.3 unit olarak ölçülmüştür. 2.5 unit hedef seviyenin altında sonuçlar elde edilmiştir.

Bu çalışmada, denge vidalarının doğru noktaya nasıl monte edileceği ve tek seferde motor test işlemlerinden nasıl geçilebileceği anlatılmıştır. Daha önceden ağırlığı belirlenmiş, titreşim azaltıcı vida ağırlıklarının, doğru açılal noktaya, doğru ağırlık ile montajı sağlanmıştır. Motor test işlemlerinde ortalama olarak, 5 ton Jet A1 uçak yakıtı kullanılmaktadır. Motor test işlemlerinin bir kez dahi az yapılmasını sağlamak için bir yöntem önermek, 5.952 lt yakıt kazancı sağlayacaktır. Bu tezde, denge vidalarının doğru noktaya takılması ile titreşimler sönümlenmiş ve yakıt kazancı sağlanmıştır.

Açılal konumları ve ağırlıkları belirlenen bu pasif titreşim yutucuların, doğru sıkma değerleriyle montajlanması ile meydana gelebilecek parça düşme ve kaybolmalarının da önüne geçilmiştir. Bu süreçte, test öncesi sökme ve takma işlemlerinin önem farkındalığı arttırılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Köse, Ö. ve Öztürk, N.A., (2018). Eksenel Gaz Türbinlerinde Kanat Parametrelerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İskenderun
- [2] Baykal, Y.E. ve Mecitoğlu, Z., (2018). Uçak Motoru Komponent Tasarımı ve Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [3] Çengel, Y. ve Boles, M., (2011). Thermodynamics: An Engineering Approach, 7th Edition, McGraw-Hill, New York.
- [4] Bacak, S ve Nart, E., (2010). Uçak Motoru Taşıma Arabası Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [5] DePriest, J., (2001). "Aircraft Engine Attachment and Vibration Control", Lord . Corporation, LL-6505
- [6] SAFRAN Inc., <https://www.safran-aircraft-engines.com/safran-aircraft-engines-pivotal-role-development-commercial-aviation>, 29 Mart 2019
- [7] Boeing Inc., <https://www.boeing.com/commercial/777/>, 29 Mart 2019
- [8] Balta, H. ve Guclu, R., (2016). Uçak İniş Takımlarının MR Damperle Yarı Aktif Bulanık Mantıklı Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [9] Boeing Inc., https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2012_q4/4/, 29 Mart 2019
- [10] T.C. Resmi Gazete, Onaylı Hava Aracı Bakım Kuruluşları Yönetmeliği (SHY-145). (28674), 11.06.2013, 1-7.
- [11] T.H.Y Teknik A.Ş., <https://turkishtech.com/TR/Hizmetlerimiz/Ucak-Bakim>, 28 Mart 2019
- [12] T.H.Y Teknik A.Ş., <https://turkishtech.com/TR/Hizmetlerimiz/Motor-APU>, 28 Mart 2019
- [13] T.C. Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü, <http://web.shgm.gov.tr/en/sikca-sorulan-sorular/274-ucusa-elverislilik-sertifikasi-nasil-temdit-edilir>, 28 Mart 2019

- [14] Paksoy, M. ve Guclu, R., (2013). Taşıt Titreşimlerinin MR Sönümleyici İle Yarı Aktif Bulanık Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [15] Çakır, Ç. ve Muğan, A., (2006). Pasif ve Yarı Aktif Kamyon Kabini Süspansiyon Sistemleri Tasarımı ve Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [16] T.C. Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü, <http://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/mevzuat/sektorel/taslaklar/SHY-OLCU.pdf>, 28 Mart 2019
- [17] Boeing Inc., <https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/airports/acaps/787.pdf>, 29 Mart 2019
- [18] Airbus Inc., https://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/publications/backgrounders/techdata/aircraft_characteristics/Airbus-Commercial-Aircraft-AC-A321.pdf, 29 Mart 2019
- [19] Airbus Inc., <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a320-family/a321neo.html#details>, 29 Mart 2019
- [20] Composites Word, <https://www.compositesworld.com/articles/aeroengine-composites-part-2-cfrps-expand>, 28 Mart 2019.
- [21] EASA, https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA-TCDS-E.066_CFM_International_S.A._--_CFM56--2-----3_series_engines-01-28112008.pdf, 29 Mart 2019
- [22] GE Aviation, <https://www.geaviation.com/sites/default/files/datasheet-genx.pdf>, 29 Mart 2019
- [23] NASA., <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120013823.pdf>, 29 Mart 2019
- [24] Academia, https://www.academia.edu/8851546/cfm_international_CFM56-3_TRAIN_IN_G_MANUAL_EFFECTIVITY_CFMI_PROPRIETARY_INFORMATION, 29 Mart 2019
- [25] EASA, [https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA-TCDS-E.007_\(IM\)_General_Electric_CF6--80E1_Series_engines-02-25102011.pdf](https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA-TCDS-E.007_(IM)_General_Electric_CF6--80E1_Series_engines-02-25102011.pdf), 30 Mart 2019

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ozan KURAL
Doğum Tarihi ve Yeri : 18.09.1980 / İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ozn.kural@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lise	Sayısal	Bursa Cumhuriyet Lisesi	1998

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013-Devam Ediyor	Türk Hava Yolları Teknik A.Ş.	Uçak Takımhane Şefi
2012-2013	Yıldız Teknik Üniversitesi	Proje Teknoloji Uzmanı

YAYINLARI

Uluslararası Bildiri

1. Kural, O. ve Güçlü, R. (2019). “Yüksek Basıncılı Uçak Motorlarının Fan Kanat Titreşimlerinin Azaltılması ve Testleri”, 4. Uluslararası Akdeniz Bilim ve Mühendislik Kongresi (IMSEC 2019) Sunum (Bildiri No : 387)