

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**GAZ TÜRBİNLİ MOTORLARDA YORULMA HASARI VE TI-6AL-4V
MALZEMESİNİN YÜKSEK SICAKLIKTAKİ SÜRTÜNME YORULMASI
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

MUSA ÇİMEN

MAYIS 2012

Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Musa ÇİMEN tarafından hazırlanan GAZ TÜRBLNİ MOTORLARDA YORULMA HASARI VE TI-6Al-4V MALZEMESİNİN YÜKSEK SICAKLIKTAKİ SÜRTÜNME YORULMASI DAVRANIŞININ İNCELENMESİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Veli ÇELİK
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Yrd.Doç.Dr. Mehmet Emin AKAY
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan	: Prof. Dr. Veli ÇELİK	_____
Üye (Danışman)	:Yrd.Doç.Dr. Mehmet Emin AKAY	_____
Üye	: Yrd.Doç.Dr. Sadettin ŞAHİN	_____

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

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Doç. Dr. Erdem Kamil YILDIRIM
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

GAZ TÜRBİNLİ MOTORLARDA YORULMA HASARI VE Ti-6Al-4V MALZEMESİNİN YÜKSEK SICAKLIKTAKİ SÜRTÜNME YORULMASI DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÇİMEN, Musa

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Mehmet Emin AKAY

Mayıs 2012, 112 sayfa

Bu çalışmada uçak jet motoru bakımında yorulma hasarlarının önemi ile ilgili konular bir örnekleme (Ti-6Al-4V malzemesine yönelik yüksek sıcaklık ve sürtünme şartlarında inceleme) ile ele alınmıştır. Çalışma dört ana kısımda toplanmıştır. Birinci kısımda yorulma hasarının tanımı, özellikleri, yorulma deneyleri ve yorulma olayını etkileyen faktörler ele alınmıştır.

İkinci kısımda uçak jet motor malzemelerinin özellikleri, jet motor malzemelerinde oluşan hasarlar ve jet motor bakımında yorulma hasarının önemi incelenmiş, jet motor bakım faaliyetlerine ve yorulma hasarlarının önlenmesine yönelik uygulanan yaklaşımlarına örnekler verilmiştir. Ayrıca, jet motor parçalarının ömürlerinin ve uygulanacak bakım aralıklarının belirlenmesi konuları incelenmiştir.

Üçüncü kısımda uçak jet motor bakımında yorulma hasarlarının belirlenmesinde kullanılan tahribatsız kontrol yöntemleri, bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları incelenmiş ve kullanım alanlarına örnekler verilmiştir.

Dördüncü kısımda General Electric firması tarafından üretilen F110-GE-100 turbofan motorlarının yorulma hasarlarının belirlenmesi için, uygulanan tahribatsız kontrol yöntemlerine örnekler verilmiş ve motorun sıcak bölgesinin imalatında kullanılan Ti-6Al-4V malzemesinin yükseltilmiş sıcaklık ve sürtünme şartları altındaki yorulma davranışına yönelik yapılmış olan testler sonlu elemanlar yöntemiyle (ANSYS analiz programında) modellenerek karşılaştırılmıştır.

Sonuç bölümünde de, uçak jet motoru bakımında yorulma hasarının önlenmesine yönelik yapılan uygulamalar ve Ti-6Al-4V malzemesine yönelik yapılan testler ve analizler karşılaştırılarak malzemenin ömrünün uzatılması için yapılması tavsiye edilen bilgiler değerlendirilerek sonuçlar çıkarılmaya çalışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yorulma, Sürtünme Yorulması, Yorulma Davranışı,
Gaz Türbünli Jet Motorları

ABSTRACT

FATIGUE DAMAGE IN THE GAS TURBINE ENGINES AND STUDY OF MATERIAL OF TI-6AL-4V FATIGUE BEHAVIOR UNDER THE ELEVATED TEMPERATURE AND FRETTING

ÇİMEN, Musa

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mecanical Engineering, Post Graduate Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mehmet Emin AKAY

May 2012, 112 pages

In this study, an exemplification is applied on Ti-6Al-4V material for high temperature and fretting condition related with importance of fatigue failure in jet engine maintenance. The study consists of four parts. First part mentions to definition of fatigue failure, features, experiment of fatigue and factors of effecting fatigue.

In the second part, features of metarial of aircraft jet engine, failure on material of jet engine and importance of maintenance for failure of fatigue had been examined. Approach used for maintenance of jet engine and preventing of fatigue failure is pointed out as a example. Definition of maintenance intervals applied on life of jet engine parts were also investigated.

In the third part non-destructive control methods used for definition of fatigue failure, advantages and disanvatages of these methodes were examined and examples for areas of their use were given.

In fourth part, instances were given about application of non-destructive control methods to identify fatigue failure of F110-GE-100 turbofan engines, produced by

General Electric. Also fatigue behaviour tests were made and compared with Finite Element Method modelling in ANSYS.

In the last part of thesis, efforts for preventing fatigue failure in aircraft jet engine maintenance and tests of Ti-6Al-4V material and FEM analysis were compared and recommendations to extend of life cycle of material were evaluated and useful results had been tried to put forward .

Key Words : Fatigue, Fretting Fatigue, Fatigue Behaviour, Gas Turbine Jet Engines

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında bana çok değerli yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. M. Emin AKAY'a, çalışmalarımda yol gösteren Mühendislik Fakóltesi Dekanı sayın Prof. Dr. Veli ÇELİK'e, ANSYS konusunda büyük yardımları dokunan TÜBİTAK - SAGE'de Mak. Müh. Tuęrul KOZAK'a, sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarımı yaparken bana her türlü yardımını ve anlayışını esirgemeyen eőim Ayőegül ÇİMEN'e de őükranlarımı sunarım.

ÖNSÖZ

Jet motoruna ait parçalar, üniteler, sarf malzemeler vb. çalışmaları esnasında çok değişken yüklemelere maruz kalırlar, bu yüklemelerin parametreleri çok değişkendir. Hava sıcaklığı, yükselti, nem veya çöl etkisi, pilotun uçağı sınır limitlerine kadar zorlaması, uçağın inişinde ve kalkışında sert darbe ve titreşimler maruz kaldıkları dinamik gerilmelere sebebiyet veren parametrelerden bazıları olarak sayılabilir. Bu yüklemelere maruz kalan söz konusu malzemelerde özellikle yorulma hasarları doğar. Bunlar yorulma, tekrarlı gerilmeler ya da şekil değişimlerin etkisi altında malzeme yapısında meydana gelen ve daha sonra çatlak oluşmasına ya da malzemenin kırılmasına yol açan değişiklikler olarak tanımlanır. Yorulma süreci maruz kalınan dinamik gerilmeler nedeniyle yapının bazı bölgelerinde hasar birikiminin oluşmasıyla başlar, hasar birikimi yüzey çatlaklarının oluşmasına ve bu çatlakların yeteri kadar ilerlemesine yol açar.

Söz konusu hasarların zamanında tespit edilememesi durumunda motor içindeki malzemeler kırılıp, bulunduğu ana malzemedan kopabilmektedir. Kopan malzeme çok yüksek hızda ve yüksek sıcaklık altında hareket eden motorun diğer döner parçalarına temas ederek, motorun ekgozundan çıkarak motoru terk eder. Ancak bu parçalar motoru terk ederken, motorun diğer malzemelerine de zarar verir. Bu tip hasara ise DAMAHA (Dahili Madde Hasarı) denir. DAMAHA olayı bazı durumlarda uçağın düşmesine bile sebebiyet verebilir. Uçak malzemelerinin geneli göz önüne alındığında, motor malzemeleri uçağın servisten çıkmasına kadar olan idame işletme sürecinde yedek malzeme maliyetinin yaklaşık % 60'ını oluşturmaktadır ve bu malzemelerin maliyetleri son teknoloji ürünü olduğu için yüksektir. Bu maliyetlerin düşürülebilmesi için DAMAHA'ya sebebiyet veren durumların önceden tespiti, yüksek maliyetli sonuçlara yol açmaması için önem arz etmektedir. Söz konusu belirlemelerin yapılabilmesi ise uzun araştırmalar gerektirmektedir. Bu araştırmaların bir çoğı ise, dünyanın en büyük iki motor üreticisine (GE ve PW) ev sahipliğı yapan ABD'de yapılmış olup, havacılık alanında atılım yapmak isteyen ülkelerin ise bu çalışmalar

parelelinde araştırmalara başlaması söz konusu yüksek teknolojiye ve orjinal ekipman üreticisine bağımlılığı azaltacağı süphesiz bir gerçektir.

Mayıs 2012

Musa ÇİMEN

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
EŞİTLİKLER	xv
SİMGELER DİZİNİ	xvi
KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
1.GİRİŞ	1
1.1 Jet motoru ile ilgili temel konular.....	8
2. YORULMA ve ETKİLERİ	11
2.1. Yorulmanın etkileri ve ayrıntıları	11
2.2. Yorulma etkilerinin seviyeleri	12
2.2.1. Çatlak meydana gelmesi	12
2.2.2. Çatlak seviyeleri.....	17
2.2.3. Çatlamanın son aşaması	20
2.3. Test çeşitleri.....	21
2.3.1. Testlerin ana kuralları	22
2.3.2. Hasara kadar geçen sürenin belirlenmesi.....	25
2.4. Hasar etkenleri	28
2.4.1. İy yapı etkileri.....	28
2.4.2. Pürüzlülüğün tesiri.....	32
2.4.3. İmalat hataları.....	33
2.4.4. Çeşitli kuvvetler.....	35
2.4.5. Malzeme kayıpları.....	38
2.4.6. Isıl etki.....	41

3. İMALAT TERCİHLERİ ve BUNLARIN DAVRANIŞ EĞİLİMLERİ	44
3.1. Malzeme seçim kriterleri.....	44
3.2. Çatlakların ilerlemesi ve oluşan hatalar	49
3.2.1. İlk aşama yorulma olayları.....	49
3.2.2. İlerleyen safhalarda oluşabilen yorulma olayları.....	51
3.2.3. Sıcaklık değişimlerine bağlı yorulma olayları.....	52
3.2.4. Çevrimsel gerilmelere ve korozif çevre koşullarına bağlı yorulma.....	53
3.3. Oluşan hataların sebep ve sonuçları.....	53
4. KULLANIM ESNASINDA OLUŞAN HASARLARIN TESPİTİ	56
4.1. Hasarının tespitinde uygulanan usuller.....	58
4.1.1. Optik aletlerle kontrol yöntemi.....	58
4.1.2. Gözle kontrol yöntemi.....	58
4.1.3. Manyetik parçacık metodu ile kontrol yöntemi.....	59
4.1.4. Penetran sıvı ile kontrol yöntemi.....	59
4.1.5. Ultrasonik kontrol yöntemi.....	59
4.1.6. Girdap akımları ile kontrol yöntemi.....	60
4.1.7. Akustik emisyon kontrol yöntemi.....	60
4.1.8. Radyografik kontrol yöntemleri.....	61
4.1.9. Yüzey kopyası ile kontrol yöntemi.....	61
4.1.10. X ışını tomografisi ile kontrol yöntemi.....	62
4.1.11. Termografi ile kontrol yöntemi.....	62
4.2. Kullanılacak usulün seçimi.....	63
5. JET MOTORU YORULMA HASARLARININ İNCELENMESİ	66
5.1. Fan bölümü.....	71
5.2. Kompresör bölümü.....	72
5.3. Yanma odası bölümü	73
5.4. Türbin bölümü	74
6. TÜRBİN İMALATINDA KULLANILAN, YÜKSEK SICAKLIK VE SÜRTÜNME ALTINDA ÇALIŞAN TI-6AL-4V MALZEMESİNİN YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ	76
6.1 Yüksek Sıcaklıklardaki Sürtünme Yorulmasının Konfigürasyonu.....	78

6.2 Sürtünme Katsayısı.....	83
6.3. Yükleme Değerleri.....	85
6.4. Kırılma Bölgesi.....	86
6.5. Kırılma Açısı.....	87
6.6. Farklı Kombinasyonlarda Yapılan Testlerin Karşılaştırılması.....	87
6.7. Sonlu Elemanlar Analizi Kullanılarak Yapılan Testlerin Doğrulanması.....	94
7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	100
7.1. Genel değerlendirme.....	100
7.2. Testler Hakkında Değerlendirme.....	100
7.3. Kullanım aşamasında dikkate alınması gerekli hususlar.....	104
7.3.1. Dizayn sürecinde doğru malzeme ve imalat yönteminin seçilmesi.....	104
7.3.2. Seçilen malzemenin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi	106
7.3.3. İmalat hatalarının azaltılması.....	107
KAYNAKLAR.....	109

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
6.1. Yüksek Sıcaklıklardaki Sürtünme Yorulmasının Test Sonuçlarının Özet Tablosu	90

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Türbin motor bıçağı - disk ara yüzü.....	7
1.2 Deney mekanizması (resim olarak).....	7
1.3. Sürtünme yorulması deney düzeneği kurulum şeması.....	8
2.1. Kafes yapıda oluşabilen hasarlar.....	14
2.2. Kuvvetlerin etkisi sonucunda oluşan yüzey bozuklukları.....	15
2.3. Kırılma öncesi bölgeler.....	16
2.4. Kırılmaya kadar giden çatlakların çeşitleri.....	17
2.5. Gerilme şiddet faktörü çatlak sürecine etkileri	19
2.6. Sabit genlikli gerilmenin zamanla değişimi.....	22
2.7. Değişken genlikli gerilmelerin görünümü.....	23
2.8. Yorulma deneyi ile ilgili temel terimler.....	24
2.9. Kuvvet değişimi karşısında kırılma grafiği eğrisinin değişimi.....	26
2.10. Şekil değişimine giden yolda kırılma ömrünün eğrisi.....	27
2.11. Çok kullanılan malzemelerin gerilme-ömür grafikleri.....	29
2.12. Oluşan çatlak için genel bir örnekleme.....	30
2.13. Delinme, fiber kopması ve delaminasyon oluşumunun genel görünüşü.....	31
2.14. Karbon, cam ve aramid epoksinin etki eğrileri.....	32
2.15. İmalat hataları ve gerilme yığılımları.....	34
2.16. İki farklı kuvvet uygulamasında oluşan hasar eğrileri.....	35
2.17. Ortalama gerilme çeşitleri için kuvvet ömür grafikleri.....	37
2.18. Kuvvet çeşitleri için gerilme ömür grafikleri.....	38
2.19. Uygun olmayan koşullarının malzeme ömrüne etkisi.....	41
3.1. Çok kullanılan malzemelerde çatlak ilerleme değişimleri.....	48
3.2. Çatlak ilerleme düzenleri.....	54
5.1. Bir turbofan jet motorunun genel görünüşü.....	67
5.2. Turbofan motorunun ana komponentleri.....	68
5.3. Fan bölümündeki parçalar.....	71

5.4. Kompresör bölümündeki parçalar.....	72
5.5. Yanma Odası bölümündeki parçalar.....	73
5.6. Türbin bölümündeki parçalar.....	74
6.1. 22.2 kN'luk Servohidrolik Test Cihazı.....	76
6.2. Testlerde kullanılan numune ve pedler.....	79
6.3. Sıcaklığın kulplarla ölçümesini gösteren diyagram.....	80
6.4. Test Konfigürasyonunda yer alan pedlerin üzerindeki sıcaklık eğrileri.....	82
6.5. Isıtıcı lambaların konfigürasyonu.....	83
6.6. Numune üzerindeki sıcaklık analizi.....	84
6.7. Yüksek sıcaklık altındaki testlerde tekrar sayısına karşı sürtünme katsayısının değişimi.....	85
6.8. Kırılan numunenin görünümü	87
6.9. Yüksek sıcaklıklarındaki sürtünme yorulması bilgileri ($\Delta\sigma$ ile N_f).....	91
6.10. Sürtünme yorulmasının oda sıcaklığı ile yüksek sıcaklık değerlerinin değerlendirilmesi ($\Delta\sigma$ ile N_f grafiği eşliğinde).....	92
6.11. Sürtünme Yorulması ve Normal Yorulmanın oda sıcaklığı şartlarındaki karşılaştırılması ($\Delta\sigma$ ile tekrar sayısı eşliğinde).....	93
6.12. Ağ Modeli (Genel Görünüm).....	95
6.13. Ağ Modeli (sürtünme bölgesinde kullanılan daha yoğun ağ modeli).....	95
6.14. 442 MPa aksenal gerilim ve sürtünme altında çekme numunesi üzerinde aksenal gerilme dağılımı-1	96
6.15. 442 MPa aksenal gerilim ve sürtünme altında sürtünme bölgesi üzerinde aksenal gerilme dağılımı-2.....	96
6.16. 442 MPa aksenal gerilim ve sürtünme altında sürtünme bölgesi üzerinde aksenal gerilme dağılımı (100 kat büyütülmüş).....	97
6.17. 78 MPa aksenal gerilim ve sürtünme altında çekme numunesi üzerinde aksenal gerilme dağılımı.....	98
6.18. 78 MPa aksenal gerilim ve sürtünme altında sürtünme bölgesi üzerinde aksenal gerilme dağılımı.....	98

6.19. 78 MPa aksenal gerilim ve sürtünme altında sürtünme bölgesi üzerinde aksenal gerilme dağılımı (100 kat büyütülmüş).....	99
--	----

EŞİTLİKLER DİZİNİ

- 2.1 : Çatlak ilerleme hızı ile gerilim Şiddet faktörünün arasmdaki ilişki
- 2.2 : Ortalama gerilme
- 2.3 : Gerilme aralığı
- 2.4 : Gerilme ortalaması
- 6.1 : Gaz kolunun toplam gerçekleşen çevrim sayısı
- 7.1 : Teğetsel yükleme

SİMGELER DİZİNİ

A	: Malzeme sabiti
a	: Çatlak boyutu (mm)
da	: Çatlak boyutundaki değişim (mm)
dN	: Çevrim sayısındaki değişim
$\frac{d_a}{dN}$: Çatlak ilerleme oranı (mm/çevrim sayısı)
ΔK	: Gerilme şiddet faktörü aralığı
ε	: Şekil değişimi, uzama (mm)
σ	: Gerilme (MPa)
%	: Yüzde
C	: Sıcaklık birimi (santigrat derece)
F_A	: Actuator Kuvveti (Test cihazından okunuyor.)
F_F	: Frame Kuvveti (Test cihazından okunuyor.)
H	: Emniyetli çalışma ömrü
I	: Kontrol aralığı
J	: Emniyet faktörü katsayısı
K_c	: Gerilme şiddet faktörü
m	: Metre
mm	: Milimetre
MPa	: Mega pascal
Pa	: Pascal
P_p	: Kalan mukavemet değeri
P	: Çatlak tespit olasılığı
ρ	: Malzeme sabiti
R	: Gerilme oranı
S	: Gerilme
s	: Hata sınırı
T	: Bakım aralıkları

V	: Yorulma çatlak başlangıcı işareti
CIC	:Cruise Intermediate Cruise- Gaz Kolunun Pozisyon Değişirmesi
KSY	: Kısa Ömürlü Yorulma (Low Cycle Fatigue)
FTC	: Tam ısıl çevrimi
TAC	:Total Accumulated Cycle-Toplam Gerçekleşen Çevrim
TKY	: Tahribatsız Kontrol Yöntemleri

KISALTMALAR DİZİNİ

a	: Sürtünme Temas Genişliğinin Yarısı
A	: Numunenin kesit alanı
b	: Numunenin kalınlığının yarısı
E	: Elastisiye modülü
F	: Sürtünme katsayısı
K	: Eğrilik yarıçapı
m	: Malzeme parametresi
N	: Kırılana kadar tekrar edilen yükleme sayısı
P	: Normal Yükleme
Q	: Teğetsel yükleme
Q_{max}	: Maksimum eksenel yükleme
Q_{min}	: Minumum eksenel yükleme
r	: Pedin yarıçapı
R	: Yükleme oranı
w	: Nunune genişliği
$\Delta\sigma_{axial}$: Eksenel yükleme değişimi
θ	: Gözlemlenen çatlak açısı
σ_{axial}	: Eksenel yükleme
$\sigma_{nominal}$: Nominal yükleme

$\sigma_{axial,max}$: Maksimum aksenal yükleme
$\sigma_{axial,min}$: Minimum Aksenal yükleme
σ_m	: Ortalama Gerilme
α	: Genlik
max	: Maksimum
min	: Minimum
dev/dak	: dakikada dönüş sayısı

1. GİRİŞ

Gaz türbinli motor komponentleri, üretilip, servise verilmelerinin ardından, kullanım ömürleri boyunca çalışmaları esnasında, değişik çalışma şartlarına ve çalışma gerilmelerine maruz kalır. Motor içerisinde hareket eden ve dönen parçaların yarattığı merkezkaç gerilmeleri, çalışmaları sırasında komponentlere etkiyen aerodinamik gerilmeler, titreşim ve sarsıntı yüklerinin oluşturduğu gerilmeler, yüksek sıcaklıklardan kaynaklanan ısı gerilmeler bu gerilmelere örnek olarak verilebilir. Bu gerilmelerin yanında bazı etkenlerden dolayı komponentler, sistemleri üzerinde yorulma, sürünme, korozyon, aşınma gibi mekanik malzeme hasarları meydana gelir. Bu etkenler motor içerisine girerek darbe hasarına yol açan yabancı maddeler, uçuş sırasında motorlara aşırı yüklenilmesi, atmosfer ve çevre koşulları şeklinde sıralanabilir.

Sürtünme ise iki tane sıkıştırılmış yüzey arasında titreşim ile oluşan teğet kuvvetlerin neticesinde oluşur. Bir malzeme; bir veya iki kez tekrar eden sürtünme yüklemesinin etkisi altında kaldığında, bu olay yorulma kırılmasının başlamasına ve ilerlemesine neden olabilir. İşte bu duruma “sürtünme yorulması” denir. Havacılık sektörü bu konuyla yakından ilgilenmiştir, çünkü gaz türbinli motorlarda sıklıkla bu olaya rastlanmaktadır.

Sürtünme Yorulması türbin motorundaki diskin yivi (yuvası) ile kanatçık kökü arasında oluştuğu zaman önemli bir sorun haline gelmektedir (Şekil 1.1). Üstelik bu elemanlar 250-300 °C’ye kadar yüksek sıcaklığa maruz kalmaktadırlar. Bu durum sebebiyle çatlaklar oluşur ve tamir masrafının yükselmesine neden olan parça ömürlerinin sürelerinin kısalması, yani daha kısa sürede değiştirilmesi durumlarına rastlanır.

Bu sebepten doğan beklenmedik çatlakları önlemek veya bakım maliyetlerinin azaltılması için, yüksek sıcaklıklardaki sürtünme çatlaklarının mekanizmasının saptanması zorunluluğu doğmuştur.

Sürtünme yorulması konusu bir çok farklı çalışmada ele alınmıştır. Bulardan birinde alüminyum alaşımlı bakır ile kaplanmış bir titanyum alüminyum alaşımlı malzemede (kanatçıkta) sürtünme yorulmasını araştırmak amaçlı iki çeşit test uygulanmıştır. Birinci testte sürekli ve sabit yüklemeli sürtünme altında ve değişken eksenel yüklerde uygulama yapılmıştır. İkinci testte ise; sürtünme yüklemesi değişken tutulmuş ve eksenel yükleme sabit kalmıştır. Bu çalışmanın sonucunda ise sürtünme katsayısının, kaplamasız malzemeye göre kaplamada daha düşük olduğu ortaya çıkmıştır. Bu test belli bir süre devam ettirilince, sürtünme nedeniyle kaplama malzemenin ayrılması ve malzeme çıplak kalmış, bu durumda da sürtünme katsayısı yükselmiştir.

Uygulanan yükleme şiddeti arttıkça kaplamanın kalınlığında bir azalma olduğu gözlenmiştir. Aynı mantıkla yükleme şiddeti azaldıkça kaplamanın ömrü artmış, bir milyon kez tekrarlanan yüklemeye bile dayanabilmiştir.

Çalışmada kullanılan en düşük sürtünme yüklemesi dahi test sonunda büyük derecede (boyutta ve genişlikte) bir yorulmaya yol açmıştır. Bu da sürtünmenin yorulma davranışına olan etkisini kanıtlamıştır[1].

Başka bir çalışmada sürtünme yorulma yüklemesi altında çalışan malzemenin yükleme sonucunda oluşan artık gerilmelerinin gelişimi konusunda bir araştırma yapılmıştır. Özellikle bölgesel plastik deformasyon ile sürtünme yüzeyleri arasında görülen gerilme artıkları üzerine yoğunlaşmıştır.

Sürtünme yorulmasına yönelik yükleme tekrar sayısı arttıkça söz konusu artık gerilmelerin de arttığı görülmüştür. Ancak bu tekrarlar maksimum değere ulaşıncaya kadar artık gerilmelerde de bir çözülme oluşmuştur. Bu durum ise malzemede kırılmayla sonuçlanmıştır [2].

Bir diğer çalışmada Sürtünme Ped'inin türbinlerde kullanılan çelik malzemesine yaptığı sert etki araştırılmış, ayrıca çeşitli boyutlardaki malzeme için de tekrarlanmıştır. Yapılan testler sonucunda malzemeye verilen zararın malzemenin geometrisiyle yakından ilişkili olduğu, Sürtünme Ped'inin tek başına malzemeye hasar verici etkisinin belli bir seviyede olduğu, ancak yüklemelerle birlikte bu zararın maksimum seviyeye

çıktığı belirlenmiştir. Malzemeye etki eden yükler olarak sadece teğetsel ve eksenel yüklemelerin değil, diğer kombine (malzemenin iç yapısında, diğer elemanların etkisi vb.) gerilmelerin de hesaba katılması gerektiği, malzemenin sürtünme yorulmasına dayanabilmesi için oval şekilde dizayn edilmesi gerekeceği bu dizayn öncesinde teğetsel yükleme etki grafiğinin oluşturulması ve dizaynın bu grafiğe göre yapılmasının uygun olacağı belirlenmiştir [3].

Bir başka çalışmada da sürtünme yorulması kapsamında oluşan gerilme ve kuvvetlerin kanatçık ve diskin birleştiği bölgede olduğu belirlenmiş, Şekil 1.1.'de gösterilmiş ve bu gerilmelerin istenmeyen etkilerini azaltmak için bir inceleme başlatılmıştır. Bu inceleme sonucunda modellenen kanatçık ve diskin gerilmeleri saptanmış ve bu gerilmelerin malzemeye asıl etkiyi yapmasını sağlayan artık gerilmelerin, toplam gerilmeye olan katkısı bulunmaya çalışılmıştır. Böylece malzemenin istenmeyen kırılmalarının önlenmesi adına artık gerilmelerinin olması gereken sınır değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu sonuçlar arasında disk üzerinde yer alan oyukların sürtünme kırılması gerilmeler için toplanma merkezi olarak yer ettiği, artık gerilmelerin, kontrol edilebilmesi durumunda, malzemedeki sürtünme kaynaklı kırılmaların azaltılabileceği, oluşan diğer gerilmelerle de makul seviyede başa çıkılabileceği değerlendirilmiştir[4].

Farklı bir araştırmada daha önce sürtünme yorulma testlerinde kullanılmış olan sürtünme pedi yorulma numunesi olarak tasarlanmıştır. Bu tasarımda kullanılan pedlerde çatlak başlangıçları ve bu çatlaklara ait izler bulunmaktadır. Bu çatlaklar özel bir işaret boyası ile boyanmış ve malzemedeki geçmişe yönelik oluşan gerilmelerin giderilmesi amacıyla bazı işlemler uygulanmıştır. Daha sonra bu numuneler çok yüksek yükleme tekrarlarına tabi tutulmuş ve yorulma eşik değerleri tespit edilmiştir. Daha önce ölçülen çatlak boyutları eşik değeri hesaplanırken dikkate alınmış ve ortaya çatlak ilerleme değeri çıkarılmıştır. Sonuçlar önceki gerilme değerleri ve küçük çatlaklar için analiz edilmeye çalışılmış ve çatlak boyutlarının etkileri bir çatlak modeli ile açıklanmıştır. Bu modele göre oluşan çatlaklar yüzeye çok yakın bir bölgeden başladığı belirtilmektedir. Analizlerde yükleme yoğunluk faktörü de dikkate alınmıştır. Bu bilgiler ışığında numunede yer alan ve daha önceki gerilmelerden kaynaklanan çatlak

başlangıçlarının daha sonraki çatlak başlangıç eşik değerine herhangi bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır [5].

Tüm çalışmalar göz önüne alındığında bu araştırmaların devamında ne gibi bir inceleme yapılabilir şeklinde bir değerlendirme yapılmış ve diğer çalışmalardan da çok fazla uzaklaşmadan sürtünme yorulması kapsamında ortaya çıkan malzeme olayına farklı bir yaklaşımla incelemeye başlanmıştır. Araştırmanın amacı da bu paralelde öncelikle sürtünme yorulma çatlaklarının başlangıç davranışının Alüminyum alaşımlı Titanyum (Ti-6Al-4V) için incelenmesidir. Araştırmada bu alaşımın seçilmiş olmasının nedeni ise uçak motorlarında bu malzemenin kullanılıyor ve tercih ediliyor olmasıdır.

Sürtünmenin en çok zarar verdiği görülen durumda yorulmanın gerçekleştiği (malzemenin) kesit alanında ciddi bir azalma olmaktadır. Alaşıma ait oda sıcaklığı çalışmaları geniş bir aralıkta yer almaktadır. Ancak bu güne kadar yapılan ve yayınlanan çalışmalara bakıldığında hem sürtünme altında ve hem de yüksek sıcaklıkta çalışan bu tür alaşımların yorulma davranışlarının incelenmediği bu sebepten dolayı bu konunun araştırmaya açık olduğu değerlendirilmiştir.

Bütün bu durumlar bize yorulma davranışlarının incelenerek yüksek sıcaklık ve sürtünme altında çalışan alaşımların ömürlerinin uzatılabilmesi maksadıyla koruyucu önlemler içeren çalışmaların, malzeme davranışlarının incelenmesi amacıyla yapılan/yapılacak çalışmaların paralelinde yürütülmesinin gerekli olduğunu göstermektedir.

Sürtünme yorulması araştırması yorulma ve yıpranma etkilerinin kombinasyonu şeklinde olmaktadır. Söz konusu bu etkilere ulaşabilmek için bu çalışmada türbindeki malzemeyi etkileyen kompleks kuvvetler kullanılacaktır. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yüksek sıcaklık şartlarındaki Alüminyum alaşımlı Titanyum, (Ti-6Al-4V) malzemesindeki sürtünme yorulması deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Bu çalışmadaki maksimum sıcaklık değeri gerçek şartlara paralel olarak 250 °C olarak belirlenmiştir. Çeşitli numuneler ömür bilgilerinin bulunabilmesi amacıyla farklı gerilme değerlerinde test edilmiştir. Temas eden yüzey boyunca çatlak başlangıç

bölgesi kabaca incelenmiştir. Sürtünme Yorulması testleri boyunca kullanılan deney koşulları kullanılarak gerilme durumlarını tahmin etmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Yüksek sıcaklıklardaki sürtünme yorulmasında oluşan çatlak başlangıcı üzerindeki normal ve kırılma gerilmelerinin rolünü tanımlayabilmek adına sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen tahminler deneysel bulgular ile karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda oda şartlarındaki sürtünme yorulmasının genel bilgileri ile yüksek sıcaklıklardaki durum bilgileri ve normal yorulma bilgileri ile de sürtünme yorulma bilgilerinin yer aldığı bulgular karşılaştırılmıştır.

250 °C'deki sıcaklığın oda şartlarındaki sıcaklıkla karşılaştırıldığında Ti-6Al-4V malzemesindeki sürtünme yorulması başlangıcı üzerine herhangi zarar verici bir etkisi olup olmayacağı da tespit edilen bir diğer husustur. Anı şekilde sürtünmenin de yorulma davranışına olan etkisi araştırmada elde edilen bulgular ışığında irdelenecektir.

Şekil 1.1.'de testin kaynağının anlaşılabilmesi için disk ve türbin kanatçığının sıkı geçme ile üretilmiş resmi görülmektedir. Şekil 1.2.'de bu çalışmaların yapıldığı deney aparatı resim olarak gösterilmiştir. Şekil 1.3.'de ise kuvvetlerin şematik gösterimi sunulmuştur. Şekil 1.1.'de görülen iki adet gövdeden bir tanesi sürtünme için kullanılan ped (Şekil 1.1.'de disk), diğeri ise sürtünme yorulmasına maruz kalacak olan numunedir (Şekil 1.1.'de kanatçık olan).

Bu gövdeler birbirini yandan gelen yay kuvveti vasıtasıyla basınç altına alırlar ve bu baskı kuvveti ise sabit P kuvvetidir. Bu durum sabit ve sürekli olarak devam eder. Servohidrolik test makinesi ise sürtünme yorulmasının sağlanamsı için eksenel $\sigma_{eksenel}$ yüklemesini sağlamaktadır. Bu yüklemeler esnasında Q eksenel kuvveti $\sigma_{eksenel}$ 'in tersi yönünde oluşmakta ve bu kuvvet yayların sertliğine bağlı olarak gerçekleşmektedir.

Bu çalışmada yukarıda açıklanan konfigürasyona ilave olarak sürtünmenin yaşandığı bölgenin sıcaklığının artırılabilmesi amacıyla iki adet kızıl ötesi spot lamba konmuştur. Böylece sıcaklık istenildiğinde artırılabilir.

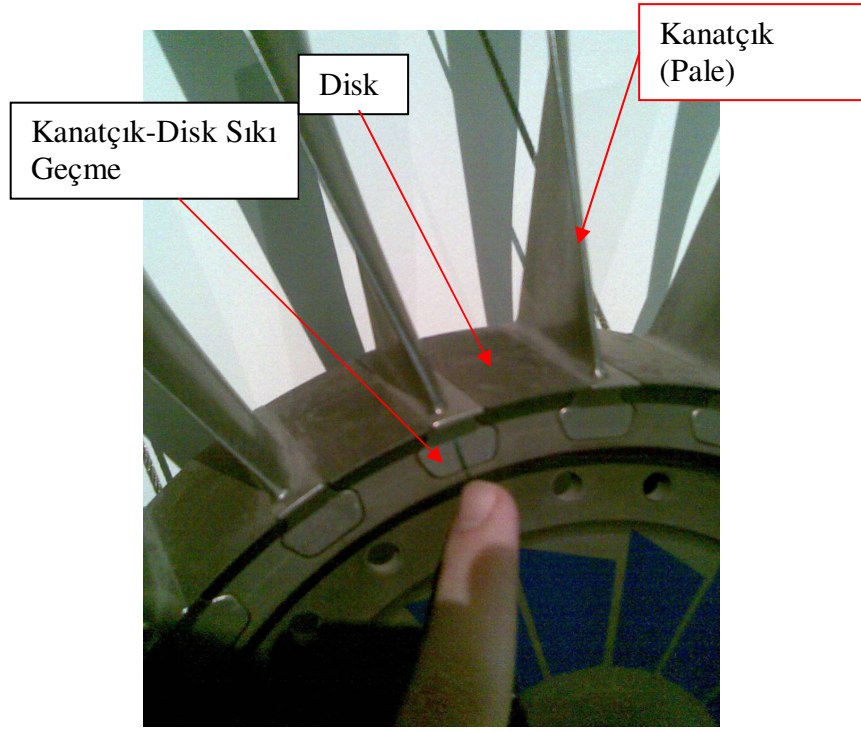
Deney sıcaklıkları için 250 °C seçilmiştir. Bu sıcaklık malzemelerin çalışma sıcaklığı olmuştur. Buna ilaveten sürtünmeden kaynaklanan bir parça sıcaklık artışının da yaşanabilme ihtimali de vardır ancak göz ardı edilebilecek seviyededir.

Konfigürasyon her deney için aynıdır ancak hem düşük hem de yüksek yorulma rejimlerinde sürtünme yorulmasındaki çatlak başlangıcının bulunabilmesi için uygulanan yüklemeler çok değişken bir aralıkta tutulacaktır.

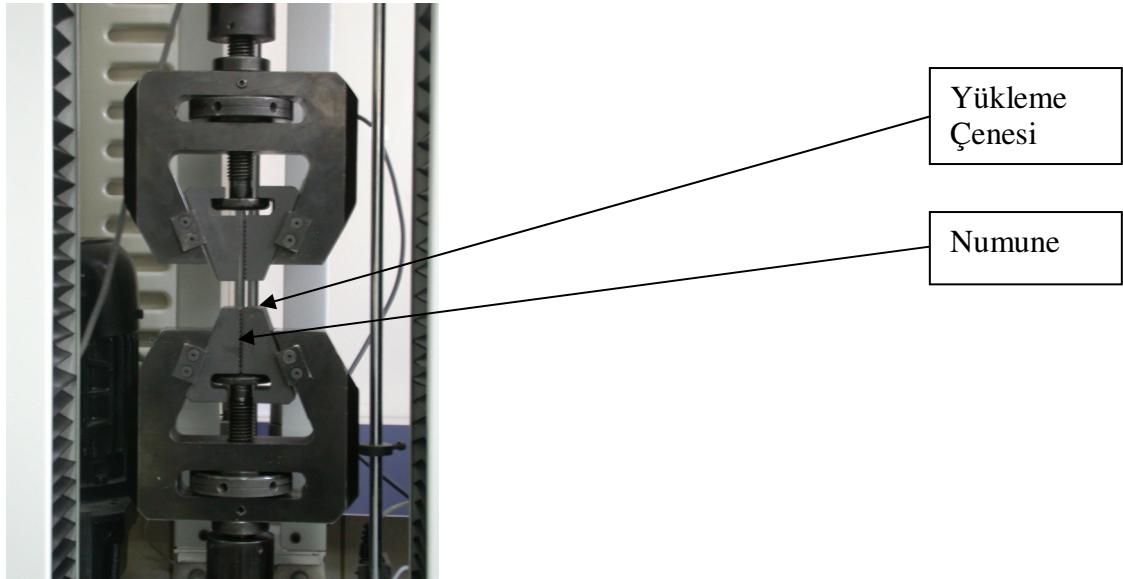
Bugüne kadar sürtünme yorulması hakkında yapılan çalışmalar incelendiğinde deneylerin ve incelemelerin hep oda sıcaklığında yapıldığı gözlenmektedir. Bu çalışmanın ana konusu Alüminyum alaşımlı Titanyum malzemesinin (Ti-6Al-4V) yorulma davranışının sürtünme ve sıcaklık değişimi karşısında nasıl etkilendiğinin tespit etmektir.

Değerlendirmelerde yükseltilmiş sıcaklıklardaki sürtünme yorulması ömrünün grafiği elde edilmiş ve çatlak başlangıcı tahmin analizi yapılmış olacaktır. Bunlar hesaplanırken çeşitli yorulma parametreleri hesaba katılacaktır.

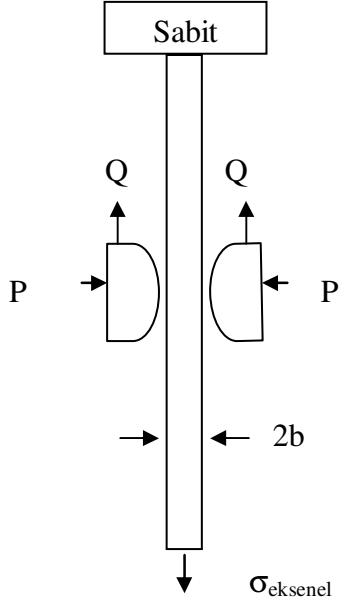
Sürtünme yorulmasından kaynaklı deneysel gözlemler çatlak başlangıcını tahmin etmek için değerlendirilecektir. Temas yüzeyi boyunca oluşan çatlak bölgesi, çatlağın oluşma kaynağının belirlenmesi ve çatlak başlangıcının oluşmasının görülmesine kadar deneysel gözlemler sürdürülecektir. Sonuçta; oda sıcaklığında ve yükseltilmiş sıcaklıklardaki hem sürtünme hem de normal yorulma bilgilerine göre sıcaklık etkisi gözden geçirilecektir.



Şekil 1.1. Türbin Motor Bıçağı - Disk Ara yüzü



Şekil 1.2. Deney Mekanizması (Resim olarak)



Şekil 1.3. Sürtünme yorulması deney düzeneği kurulum şeması

1.1 Jet Motoru ile İlgili Temel Konular

Gaz türbinli motor malzemeleri çalışmaları sırasında etki altında kaldıkları dinamik gerilmeler sebebiyle yorulma olaylarına ve buna bağlı olarak hasarlara maruz kalırlar. Bunlar yorulma tekrarlı gerilmeler ya da şekil değişimlerin etkisi altında malzeme yapısında meydana gelen ve daha sonra çatlak oluşmasına ya da malzemenin kırılmasına veya çatlmasına yol açan olaylar olarak tanımlanır. Yorulma olayı maruz kalınan dinamik gerilmeler nedeniyle yapının bazı bölgelerinde hasar birikiminin oluşmasıyla başlar, hasar birikimi yüzey çatlaklarının oluşmasına ve bu çatlakların ilerlemesine yol açar. Çatlakların, kalan yapı kesitine yüklenen yükü taşıyamayacak düzeye kadar azalması ile ani bir kırılma olayı gerçekleşir [6].

Yorulma olayı, jet motorları gibi mühendislik malzemelerinin servis ömürlerinde karşılaştığı mekanik malzeme hasarlarının yaklaşık % 60'ının başlıca sebebinin oluşturur [7]. Jet Motor malzemelerinin kullanımda karşılaşılan hasarların büyük bir

çoğunluğunu yorulmadan kaynaklanan hasarlar oluşturmaktadır. Malzemelerde daha sık oluşan hasarlar birincil hasar türü şeklinde, daha az sıklıkta oluşan hasarlar ise ikincil hasar türü şeklinde tanımlanmıştır.

Uçak jet motor malzemelerinde kullanım esnasında meydana gelen yorulma hasarlarının, uçuş emniyetini riske sokacak daha önemli sorunlara yol açmaması için zamanında belirlenmeleri gerekir. Yorulma hasarı veya hataları, kendilerini yüzeyden başlayan çatlaklar şeklinde göstermesinden dolayı, kullanım sırasında parça ya da komponent yüzeylerinin ve iç yapılarının çatlak kontrolü ile yorulma hasarlarının varlığı belirlenebilir. Yorulma çatlaklarının belirlenmesi ve ilerlemesinin izlenmesi, üretici firmalar tarafından belirlenmiş ve kullanıcıların bakım programlarında ve el kitaplarında yer alan aralıklarla uygulanan kontrol ve bakım faaliyetleri bünyesindeki Tahribatsız Kontrol Yöntemleri'nin (NDI Non-destructive Inspection) uygulanması ile yapılır.

Tahribatsız Kontrol uygulamaları; herhangi bir malzemenin bileşimi, geometrisi, imalat ve yapı hataları hakkında bilgi edinmek amacıyla malzemenin fiziksel ve fonksiyonel özelliklerine zarar verecek herhangi bir hasara uğratmadan yapılan deneylerdir. Yorulma hasarı sebebiyle hasara uğradıklarında uçuş emniyetini riske sokabilecek kritik malzemelerde oluşan yorulma çatlaklarının, kırılma olayının gerçekleştiği kritik bir büyüklüğe ulaşmadan önce tahribatsız kontrol yöntemleri ile tespit edilmesi ve uygun önlemlerin alınmasıyla, malzemelerin kullanımda çalışması esnasında hasara veya hataya uğraması engellenerek, uçuş için yeterli ve gerekli emniyet, güvenilirlik sağlanmış olur.

Daha yüksek tepki/ağırlık oranına sahip daha verimli gaz türbinlerinin havacılıkta kullanılmaya başlanmasıyla, jet motor malzemeleri daha yüksek sıcaklıklarda, sürtünmelerde ve çalışma yükleri altında çalışmaya başlamıştır. Bu sebeple jet motor malzemelerinde karşılaşılan yorulma hasarları ve hataları artmıştır. Artan yorulma nedenli hasarların indirgenmesine yönelik, yorulma olayı üzerinde bir çok araştırma yapılmıştır.

Yorulma konusunda elde edilen bilgilerin artması ve kırılma mekaniği bilimindeki gelişmelere paralel olarak gaz türbinli motor kontrol faaliyetleri de gelişmiştir. Jet motor malzemelerinde yorulma hasarının önlenmesine yönelik çeşitli tasarım yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu tasarım çalışmalarının amacı, uçak ve sistemdeki teknolojik gelişmelere paralel olarak sürekli gelişen kontrol yöntemleri ve prosedürleri ile birlikte tasarım esnasında motor parçalarının kullanım ömürlerinin uygulanacak kontrol aralıklarının belirlenmesi gibi uygulamalarda genel kural yaklaşımıyla kullanılmıştır.

2. YORULMA ve ETKİLERİ

2.1. Yorulmanın Etkileri ve Ayrıntıları

Kullanım esnasında malzemelere etkiyen ve şiddeti ve yönü sürekli olarak değişen, tekrarlı gerilmelerin ve şekil değişmelerin etkisi altında malzemede meydana gelen bölgesel ve kalıcı iç yapı değişiklikleri sonucunda yüzey çatlaklarının oluşması ve belirli bir yükleme, şekil değişimi tekrar sayısından sonra bu çatlakların ilerleyerek malzemenin kırılması yorulma hasarı şeklinde tanımlanır [8]. Yorulma olayı, maruz kalınan dinamik gerilmeler sebebiyle iç yapının bazı bölgelerinde hasar yoğunlaşması oluşmasıyla başlar, hasar yoğunlaşması çevrimsel gerilmelerin etkisiyle çatlakların oluşmasına ve bu çatlakların ilerlemesine yol açar. Bu çatlaklardan en baskın olanı, dinamik gerilmelerin etkisiyle ilerler ve nihayetinde kırılma olayı, malzemenin maruz kaldığı yükleri taşıyamadığı sınırdan oluşur.

Malzemenin akma mukavemetine ulaşamayan sürekli gerilmelere maruz kalması sonucunda yorulma ve akabinde çatlak oluşuyor dememiz yanlış olmaz. Ancak kısa bir kullanımdan sonra oluşan yorulma şeklindeki olaylara veya malzemenin dikkat çekici biçimde sertleşmesi sonrasında yorulma olayına neden olan gerilmeler malzemenin akma gerilmesi üst sınırından fazla bir şiddetle de gerçekleşebilir. [9]

Maruz kalınan sıcaklık değişimleri sonucunda, değişken ve sürekli yükler altında oluşabilen yüklerin tesiri sonucunda ve sürtünmenin sürekli ve inatçı bir şekilde devam etmesi sonucunda da yorulma olayı meydana gelebilir. Ayrıca sıcaklık değişimlerinin mekanik gerilmelerle birlikte etkimesi sonucunda ısıl-mekanik yorulma, malzeme eksilmesi dediğimiz korozyon yorulması, birbiri üzerinde kayan ve sürtünen yüzeylerin arasında aşınma yorulması, yuvarlanan yüzeylerin temas noktalarında temas yorulması diye adlandırılan yorulma çeşitleri de vardır.

Gaz türbinli motorların malzemelerinin çalışmaları esnasında oluşan hatalarının en önemlisi olarak yorulma kaynaklı kırılmaların olduğu varsayılmaktadır. Buradaki en

önemli nokta ise yorulmaya bağlı kırılmaların herhangi bir zamanda ve beklenmedik bir biçimde gelerek ona karşı tedbir alınmaması olarak değerlendirilebilir. Böylece kırılan parça belki de bağlı olduğu bir üst ünitenin arızalanmasına veya uçak ve insan kaybına bile neden olabilmektedir.

2.2. Yorulma Etkilerinin Seviyeleri

Genellikle yüzeydeki bir kırılma, bir imalat hatası sonucunda oluşan çentik veya malzemenin kesit farklılaşmaları yorulma olayının buralarda başlayabileceğine işaret etmektedir. Kırılmalar plastik şekil değişiminin, çekme gerilmesinin ve çevrimsel gerilmelerin aynı zamana denk gelecek şekilde etki etmesi sonucunda olmaktadır. Aslında söz konusu bileşenlerden herhangi bir tanesinin var olmaması durumunda yorulma çatlakları hiç oluşmayacak ve kırılma da meydana gelmeyecektir. Sürekli ve sabit gerilme ile plastik şekil değişimi çatlak oluşumunu tetikler, çekme gerilmesi de çatlak ilerlemesini başlatabilir. Çekme gerilmelerinin tersi yönündeki basma gerilmeleri de meydana getirdikleri çekme yönündeki kalıntı gerilmeleri nedeniyle yorulma hasarına sebep olmaktadır. Ancak, basma gerilmeleri yorulma çatlaklarının ilerlemesinde çok fazla bir role sahip değildirler [8]. Yorulma kırılmasındaki evreler olarak; çatlak meydana gelmesi, çatlak seviyeleri, çatlamanın son aşaması sıralanabilir.

2.2.1. Çatlak Meydana Gelmesi

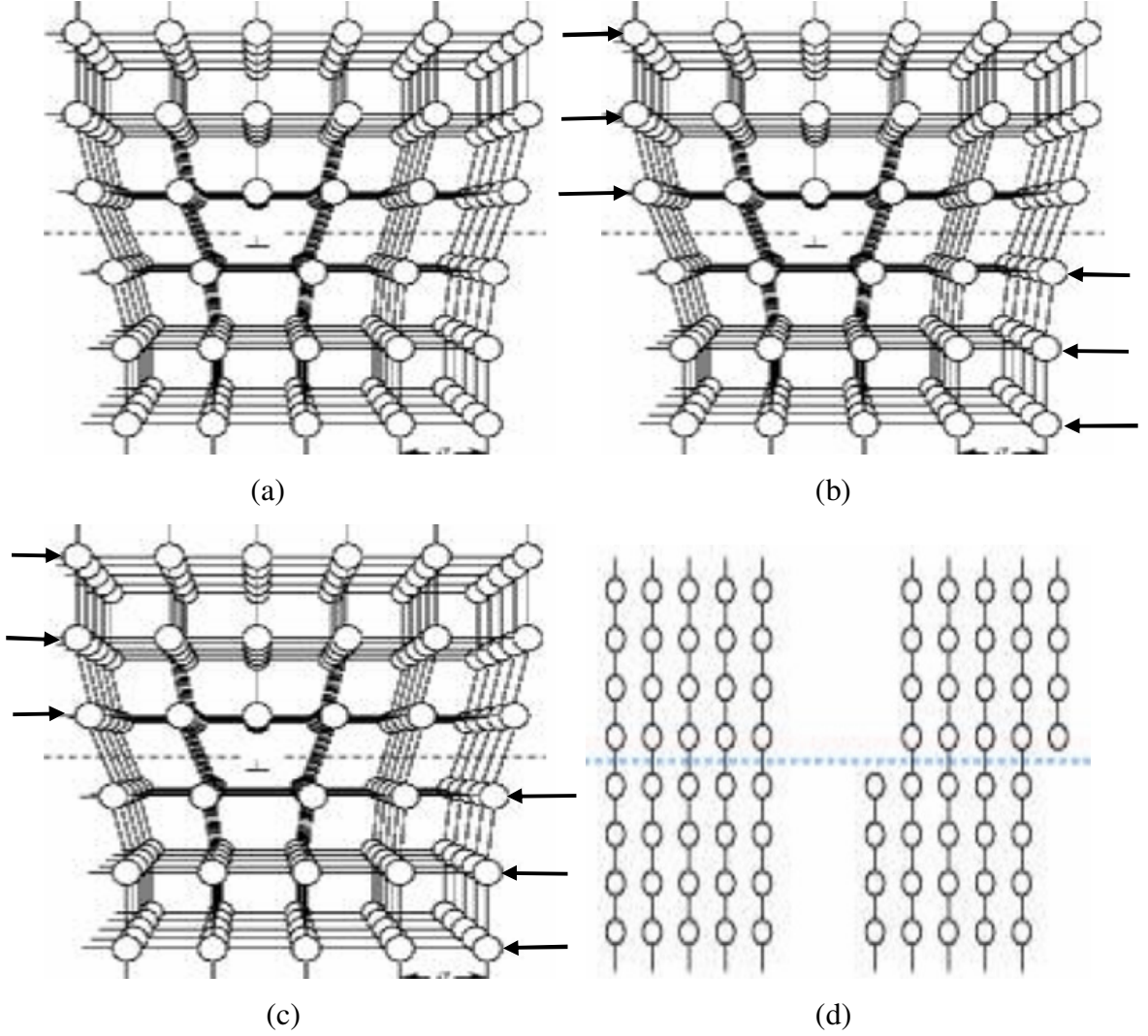
Bölgesel mukavemetin en az olduğu nokta veya bölgesel gerilmelerin en fazla olduğu noktada yorulma çatlakları meydana gelir. Yoğunlaşan gerilme değeri, etkiyen gerilmenin şiddeti, gerilme tipi ve temel gerilmeleri yoğunlaştıran malzemeye ait yüzey kusurları gibi bölgesel özellikler ile ilgili parça biçimi ile belirlenir. Yoğunlaşan direnç de, halihazırdaki karma gerilmelerin ve devamlı olmayan yüklerin araştırılması ile tespit edilebilir. Yorulma çatlakları için en iyi çözümlerden biri olan mükemmel imalat demek, yüzeyde pürüzsüz ve içyapıda homojenliği sağlama gibi bir çalışmadan

geçmektedir. Böylece yorulmanın başlıca nedenlerinden biri olan gerilme yığılımlarının da önüne geçilebilecektir. Metalurjik olaylardan malzeme kalıntıları, çökeltiler, parçaçıklar, tane sınırları gibi kristal süreksizlikler malzemenin yapısı içerisindeki yorulma çatlak oluşumuna sebep olan mikroskobik gerilme yığılımlarına örnek olarak gösterilebilir [11].

Sürekli gerilmeler etkisiyle kristal yüzeylerin hareket etmesi sonucunda çentik benzeri girintiler, çıkıntılar gibi yüzeyde oluşan süreksizliklerde çatlak başlangıç bölgeleri oluşabilir. Yorulma çatlakları, sürekli gerilmelere maruz kalması sonucunda meydana gelen kalıcı şekil değişimleri sonucu da gerçekleşebilir [11].

Belli bir alanda oluşan kalıcı şekil değişimi sonucu oluşan yorulma çatlaklarının başlangıcı, kayma hareketleri sonucunda malzeme kesitindeki girinti ve çıkıntıların oluşmasıyla ilişkilendirilmiştir. Devamlı artan gerilmelerin etkisiyle meydana gelen şekil değişimi tek yönlüdür. Ancak yorulma olayına sebep olan gerilmelerde, yükler nedeniyle oluşan şekil değişimi, sürekli yön değiştirerek büyüklük açısından artarlar veya azalır. Bahsedilen şekil değişimleri, malzemenin kristal yapısı tarafından tam elastik olarak giderilebildikleri sürece risk arz etmezler, ancak uygulanan gerilmeler elastik sınır altında olsa da gerilme yığılımlarına bağlı olarak, malzeme kusurlarına etkileyen gerilmeler akma sınırının çok üzerinde gerçekleşebilir. Malzeme yapısı içerisinde mikro boyutta bu gerilmeler etkisinde, bölgesel kalıcı şekil değişimleri oluşur. Basit, kalıcı ve azımsanabilecek şekil değişimleri kırılma olayı olmaksızın kristal kafes tarafından tolere edilebilir. Sürekli şekil değişimleri, kristal kafesin farklı bölümlerinin yeni bir denge durumu sağlanıncaya kadar ötelenmesi vasıtasıyla meydana gelir. Kayma kafes kısımlarının birbirlerine göre ötelenmelerine denir. Olay kayma düzlemleri olarak adlandırılan bölgelerde meydana gelir. Malzemelerde, maruz kalınan elastik sınır altındaki gerilmelerde bile yapı içerisindeki mevcut diskalonyonlar bölgesel olarak hareket ederler ve kayma bantlarının oluşmasına neden olurlar. Maruz kalınan tekrarlı gerilmelerin etkisiyle, kayma bantları, malzeme yüzeyinde girintilerin ve çıkıntıların dolayısıyla çatlak oluşumuna sebep olabilecek gerilme yığılımlarının oluşmasına neden olurlar [10].

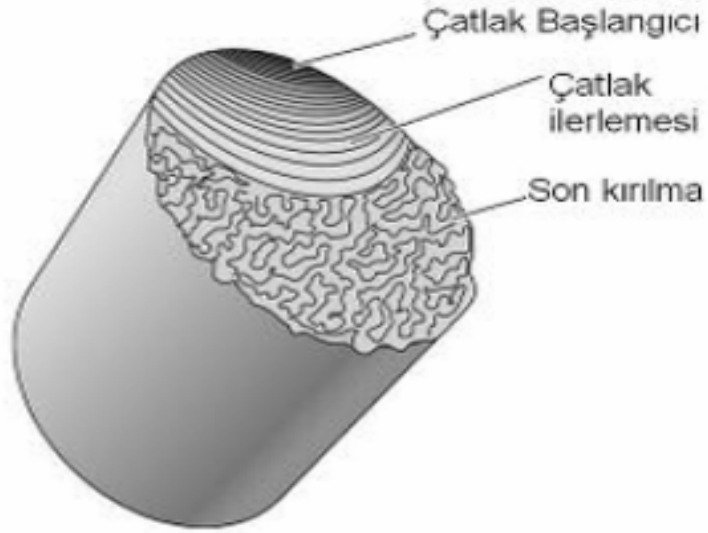
Malzemenin iç yapısında maruz kalınan tekrarlı kesme ya da kayma gerilmeleri sonucunda gösterilen kristal kafeste meydana gelen mikro yapısal değişiklikler Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Kafes yapıda oluşabilen hasarlar [10]

- Kristal kafes yapısındaki oluşan diskalasyonun görünümü
- Sürekli kesme kuvvetlerinin etkisiyle dislokasyonun hareket etmesi
- Sürekli kesme kuvvetlerinin etkisi sonucunda dislokasyonun hareketinin devam etmesi
- Kayma olayının meydana gelmesi

Sürekli kesme kuvvetleri uygulandığında Şekil 2.1.a. ve şekil 2.1.b.'deki gibi atomik bağların hareket etmesi ile dislokasyonun bir hücreden yanındaki bir hücreye geçmesine neden olur. Sürekli kesme kuvvetlerinin devam etmesi, Şekil 2.1.c. ve Şekil 2.1.d.'de görüldüğü gibi birim kayma meydana gelerek dislokasyonun kristalin sınıra ulaşmasına neden olur. Söz konusu durumun devam etmesi ile bir çok kristalde dislokasyonlar birleşerek mikroskobik çatlakları oluşturabilirler. Bu çatlakların devamında ise kırılma meydana gelir.

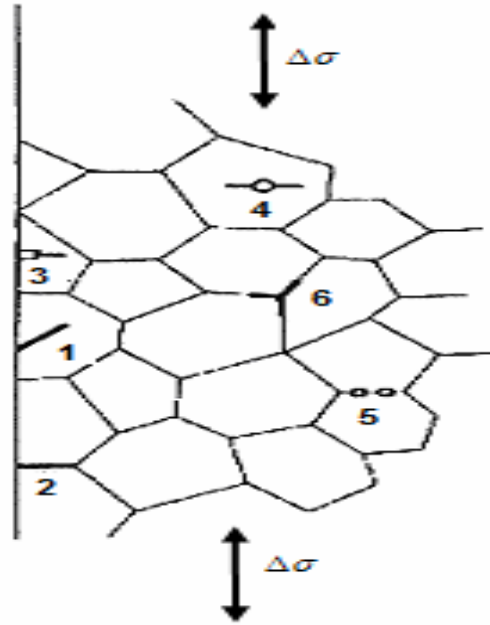


Şekil 2.2. Kuvvetlerin etkisi sonucunda oluşan yüzey bozuklukları

Gerilmenin yalnızca bir kez uygulanması yapıda fazla bir değişikliğe neden olmaz. Fakat aynı gerilmenin binlerce, milyonlarca defa sürmesinin toplam etkisi çok fazla mikro değişikliklere neden olmaktadır. Bu değişikliklerin her biri ayrı ayrı dikat çekmezler. Ancak tümünün beraber bir etkide bulunması sonucunda bir ya da birkaç kristalde yorulma çatlağının oluşmasına yol açabilecek değişikliklerin olması da kaçınılmazdır. Statik ve dinamik yüklerin etkisiyle meydana gelen şekil değişimi esnasında çok kristalli bir malzemede kaymalar oluşmaktadır. Meydana gelen kaymalar üçgensel çıkıntıların oluşmasına neden olur. Şekil 2.2.'de malzemenin kırılan yüzeyinde

oluşan görüntüde ise çatlak ilerlemesi yaşanan bölgenin daha pürüzsüz olduğu ve çatlak ilerledikçe pürüz oranının azaldığı görülmektedir. Kırılmanın veya kopmanın meydana geldiği bölgede ise yüzeyin mat ve pürüzlü olduğu gözlemlenmektedir.

Yorulma çatlağının oluşmaya başlayabileceği çeşitli çatlak başlangıç bölgeleri şekil 2.3.'te gösterilmektedir. Şekil 2.3.'te sırasıyla (1) taneleri kesen yapıda bir çatlağı, (2) taneler arası yapıda bir çatlağı, (3) yüzey kalıntısını göstermektedir. Bunların ilk ikisi kalıcı kayma bantlarının oluşturduğu yüzey çatlaklarıdır, üçüncüsü ise bazı ticari alaşımlarda gözlemlenir. Şekil 2.3.'teki (4) çatlak başlangıcına sebep olabilecek malzemenin iç yapısındaki kalıntıları, (5) tane sınırlarındaki boşluklarını, (6) ise 3 kısımlı tane sınırı kesişme kesitini göstermektedir. Malzemenin yapısındaki bu süreksizliklerin varlığı yorulma çatlağı olma ihtimalini artırır.

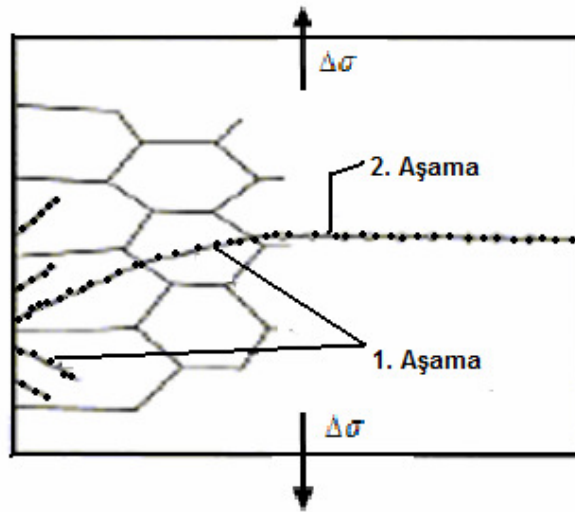


Şekil 2.3. Kırılma öncesi bölgeler

2.2.2. Çatlak Seviyeleri

Sürekli gerilmelerin ve şekil değişimlerinin etkisiyle, malzeme yapısında oluşan yorulma çatlakları ilerleyebilir. Malzemenin çatlak ucundaki yapısı, çatlakın ilerleme yönü, ilerleme hızı ve bölgesel gerilmeleri etkilemektedir. Çatlakın ilerleme yönüne göre, çatlak ilerleme aşaması üç seviyede değerlendirilebilir. İlk aşamada çatlak, uygulanan gerilme ile normaline 45° 'lik açı yapan maksimum kesme gerilmesi yönünde ilerler. Daha sonra, tekrarlı yük koşulları devam ettikçe, kesme gerilmelerine paralel yöndeki küçük çatlaklar yön değiştirerek çekme gerilmesine dik doğrultuda ilerler. Çatlak ilerleme yönü, çevre koşullarına ve maruz kalınan gerilme koşullarına bağlı olarak uygulanan gerilme yönü ile 45° 'lik açı yapan bir açılı düzleme doğru son aşamada değişebilir [10].

Taneler arası ve taneleri kesen yapıda ilerleyen yorulma çatlaklarının ilerlemedeki 1. seviye ve 2. seviye ilerleme aşamaları ve çatlak ilerlemedeki yön değişimi şekil 2.4.'te gösterilmektedir. Tek eksenli yüklemde maksimum kesme gerilmesinin normaline uygulanan gerilme ile 45° 'lik bir açı oluştururlar. Bu duruma bağlı olarak mikro çatlaklar, 45° açıyla yönlendirilmiş kristallerdeki aktif kesme kayma bantları boyunca oluşurlar.

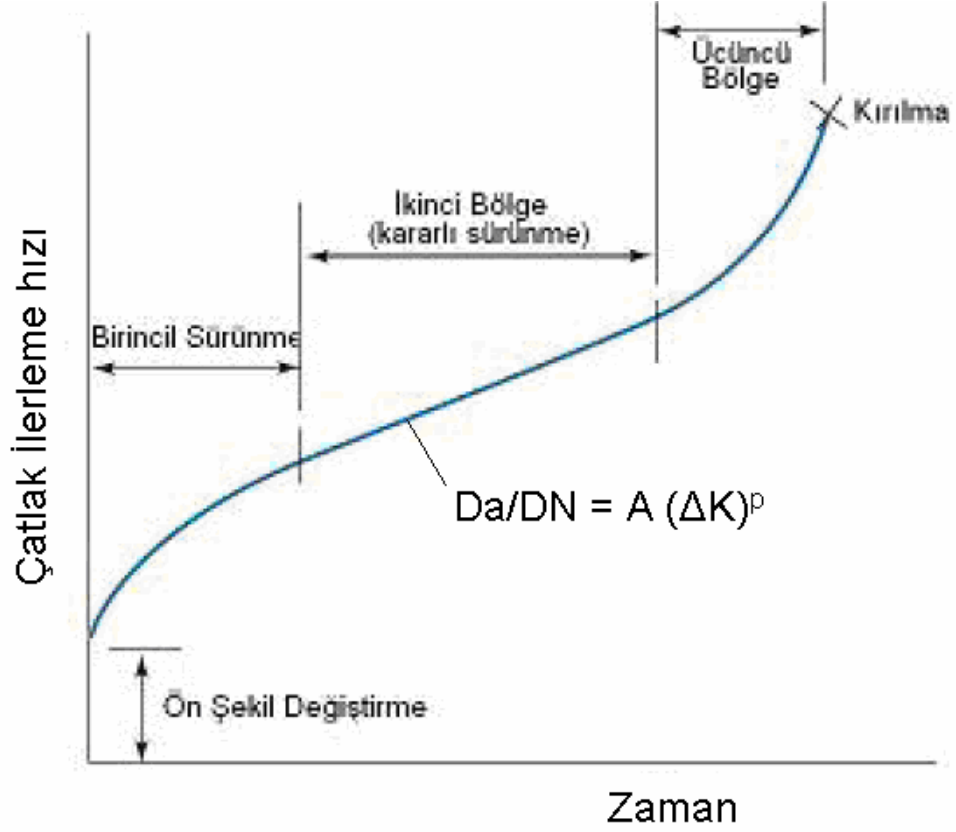


Şekil 2.4. Kırılmaya kadar giden çatlakların çeşitleri

Oluşan çevrimsel deformasyonla, oluşan çatlakların bazıları başlangıçta kayma bantları boyunca devam eder. Yorulma çatlağı oluştuktan sonra çevrimsel olarak meydana gelen kayma hareketleri boyunca ilerleyebilir. Malzemenin bağlantı noktasındaki ve çekme kuvvetine yakın olan keskin çatlak, kayma hareketlerinin kolaylıkla meydana gelebileceği çatlak uç kısmında dikkate değer bir gerilme yığılmasına sebep olur. En şiddetli kayma gerilmesi yönündeki kayma düzleminde çatlak ucunda kayma oluşur. Çatlağın boyunun artmasını ve genişlemesini kayma hareketi daha da tetikler. Kayma hareketi daha sonra diğer düzlemde meydana gelir. Diğer paralel kayma düzlemlerini, şekil değişim sertleşmesi ve artan gerilmeler aktif duruma sokar. Nihayetinde çatlak ucu körelir. Çevrimdeki yükün arttığı kısımda çatlak Δa kadar ilerler. Çatlak ucunda maruz kalınan gerilmelerin etkisiyle etrafı elastik bölge ile çevrelenmiş bir plastik bölge meydana gelir. Yükün azaldığı kısımda plastik bölgeye basma yönünde Elastik bölge tarafından gerilmeler uygular. Çatlak ucundaki akma gerilmesinin üzerinde bir değerde olan basma gerilmesi, çatlağın kapanmasına ve çatlak ucunun tekrar keskinleşmesine yol açan ters yönde bir plastik bölge meydana getirir. Çevrimsel olarak kayma hareketleri ile meydana gelen çatlağın körelmesi ve keskinleşmesi olayları ile çatlak ilerlemesi oluşturur [11].

Baskın olan çatlak çatlağın belirli bir boyuta ilerlemesi ile yavaş yavaş ortaya çıkar ve yönünü değiştirerek çekme yükü eksenine Şekil 2.4.'teki gibi dik konuma gelir. Böylece aktif kayma yönünde birkaç tane büyüklüğü boyunca tekrarlanır. Bu aşamanın uzunluğu malzemeye ve yükün genliğine bağlı olup, genellikle 3 ya da 4 adet tane büyüklüğü ile eş sevidedir. Birinci seviyede, çatlak uzunluğu malzemenin ortalama tane büyüklüğünün artışıyla ve gerilme ya da uzama genliğinin azalmasıyla ters orantılı olarak yükselir.

Çatlak ilerleme oranı ya da çatlağın ilerleme hızı yorulma olayı süresince da/dN gerilme şiddet faktörü (K) olarak tanımlanan bir parametreye bağlı olarak belirtilebilir. Formüldeki a çatlak boyu, N çevrim sayısıdır. Şekil 2.5.'de çevrim başına çatlak ilerleme hızının gerilim şiddet faktörüne bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Gerilme şiddet faktörü çatlak sürecine etkileri

Uygulanan gerilmeye, parça geometrisine ve çatlak boyutuna bağlı olarak gerilme şiddet faktörünün büyüklüğü değişkenlik gösterebilir. Çevrim başına çatlak ilerleme hızı ile gerilim şiddet faktörünün arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikteki gibi ifade edilebilir [10].

$$da / dN = A (\Delta K)^p \quad (2.1)$$

Çevresel etkilere, frekansa, gerilim oranına bağlı olarak farklı değerler alabilen A ve p ile gösterilen parametreler malzeme sabitleridirler. Şekil 2.5.'deki grafik üç ayrı bölümden oluşur. Grafiğin birinci bölümünün son kısmında gerilme şiddet faktörünün bir alt sınır değeri yer almaktadır. Bu değer, gerilme şiddet faktörünün eşik değeridir. Gerilme şiddet faktörü, bu eşik değerini aşmadığı sürece çatlakla etkiyen gerilme

seviyeleri düşüktür. Çatlaklar küçük boyutlardadır ve ilerleme hızları ihmal edilebilir düzeydedir. İkinci bölgede değişim şekilden görüldüğü gibi doğrusaldır. Üçüncü bölgede gerilme şiddet faktörünün büyük değerlerinde doğrusal olmayan bir değişim meydana gelecektir ve gerilme şiddet faktörünün belirli bir kritik değere yaklaşması ile de çatlak ilerleme hızı artar. Kırılma olayı gerilme şiddet faktörünün bu kritik değere ulaşması durumunda meydana gelir. Gerilme şiddet faktörünün bu değerine kırılma tokluğu K_c denir. Malzemenin çatlak direncinin bir ölçüsü olan kırılma tokluğu malzemenin bir özelliğidir [10].

2.2.3. Çatlamanın Son Aşaması

Malzemenin çatlaksız kesiti, yorulma çatlağı ile ters orantılı olup, yorulma çatlağı ilerledikçe azalma gösterecektir. Parçanın kalan kısmı zayıflayacak ve belirli bir noktaya gelindiğinde, parça sadece birkaç yük uygulaması ile kırılabilir hale gelecektir. Bu üçüncü aşama, son aşama yani kırılma aşaması olarak tanımlanır. Son kırılma bölgesinin büyüklüğü maruz kalınan yükün büyüklüğüne, biçimi ise kırılan parçaya uygulanan yükün biçimine, büyüklüğüne ve yönüne bağlıdır.

Sert, tok malzemelerin kalın ya da dairesel kesitlerindeki son kırılma bölgeleri, iki farklı kırılma şekli ile oluşurlar [8].

İnce levha metal parçalardaki kırılma aşaması yeteri kadar tokluğa sahip ise biraz daha farklı şekilde oluşur. Oluşan çatlak, parçanın yük taşıma kapasitesini değiştirdiği belirli bir boyuta ilerlemesinden sonra maruz kalınan gerilmelere bağlı olarak, çekme gerilmesine dik olan çatlak ilerleme yönü bu düz düzlemle 45° 'lik bir açı yapacak şekilde tekrar yön değiştirebilir. Gerilme seviyelerinin küçük değerlerde olduğu uzun ömürlü yorulma koşulları altında, kırılma yüzeyi düzlemsel görünümüne haizdirler. Gerilme değerlerinin büyük değerlerde olduğu kısa ömürlü yorulma koşulları altında, kırılma yüzeyinin düzlemi çekme yükü yönüyle 45° 'lik bir açı oluşturur.

2.3. Test Çeşitleri

Malzemenin yorulup kırılana kadar geçen zaman, çatlak oluşması ya da kırılma olayı gibi yorulma hasarı oluşması için gereken gerilme çevrim sayısı olarak belirlenir. Malzemelerin yorulma ömürleri uygulanan yorulma testleri ile belirlenir. Yorulma deneyleri laboratuvar testleri ve tam ölçekli yorulma testleri şeklinde yapılabilir.

Test ortamlarında daha önceden belirlenmiş boyutlarda belirli yüzey özelliklerine sahip örneklerle, çevrimsel olarak değişen gerilme yükleri uygulanarak bu örneklerin yorulma davranışları tespit edilir. Testler ile yapılan yorulma deneyinden elde edilen sonuçlar, benzer koşulların bulunabileceği parça tasarımında, gerekli önlemlerin alınmasına yardımcı olur. Malzemenin yaklaşık yorulma ömrü, laboratuvar standart numunelerden elde edilen deney sonuçlarının bazı düzeltme faktörlerinin kullanılması ile belirlenir. Bu düzeltme faktörlerinin belirlenmesinde pançanın şekli, yapısı, çevre ve yüzey özellikleri ve diğer değişken parametreleri göz önünde bulundurulur. Elde edilen sonuçlar yaklaşık değerler olacağı için tam ölçekli testler yapılmadan bu deney sonuçları gerçek uygulamalar için dikkate alınmamalıdır.

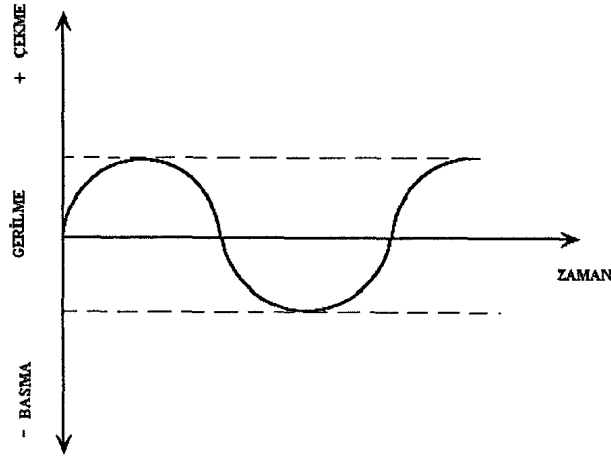
Kurulan test laboratuvarında yapılan testler, maliyet açısından tam ölçekli testlere göre çok daha ucuzdur ve uygulanma prosedürleri daha basittir. Laboratuvarında uygulanan yorulma testleri, çatlak başlangıç testleri ve çatlak ilerleme testleri olarak iki şekilde sınıflandırılır. Çatlak başlangıç testinde, yapısında herhangi bir çatlak bulundurmayan numunelere belirli değerlerdeki, çevrimsel olarak değişen gerilmeler uygulanır ve numune yapısındaki çatlak başlangıcı izlenir. Çatlağın oluşmaya başladığı çevrim sayıları belirlenir. Çatlak ilerleme testlerinde ise, yapısında belirli boyutlarda çatlak, çentik bulduran numunelere çevrimsel olarak değişen gerilme yükleri uygulanarak, çatlağın zamanla ilerlemesi takip edilir. Kırılma mekaniği metotları kullanılarak, malzemelerin çatlak ilerleme oranları tespit edilir [8].

Herhangi bir mekanik veya yapısal ağırlıklı aviyonik ünitenin, çalışması esnasında maruz kaldığı gerçek koşullarına en yakın koşulların simüle edilerek, uygulanan testlere tam ölçekli testler denilmektedir. Tam ölçekli testlerin maliyeti, laboratuvar

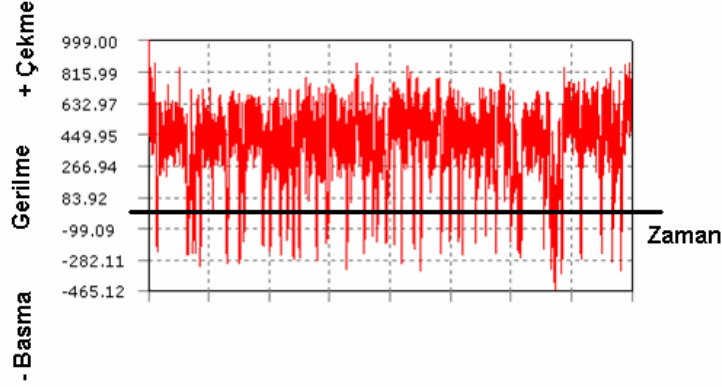
testlerine göre oldukça yüksektir. Fakat tam ölçekli testler sonucunda elde edilen bilgiler sistem ve komponentlerin tasarımı açısından çok önemlidir. Tasarım esnasında yapılan tam ölçekli testlerden elde edilen bilgiler sayesinde komponentler için uygun malzeme seçilebilir. Ayrıca yapılan tasarımın uygunluğu kontrol edilebilir, komponentlerin uygun kullanım zamanları tespit edilebilir.

2.3.1. Testlerin Ana Kuralları

Deneylede sıklıkla zamana bağıli olarak değişen gerilmeler kullanılır. Bu gerilmeler Şekil 2.6.'daki gibi sabit genlikli düzgün bir formda da olabilir veya şekil 2.7.'deki gibi sabit olmayan genlikli bir gerilme de olabilir. Yorulma deneylelerinde yorulma özellikleri belirlenecek olan parçanın çalışma şartlarında karşılanabileceği gerilmelere benzer şekilde yük dağılım tipleri uygulanabilmektedir. Aynı değerde tekrar eden gerilmeler için yorulma deneyleleri Şekil 2.8.b.'de gösterildiği gibi uygulanır. Bu gerilmeler genelde çekme-çekme, çekme-basma ve basma-basma şeklinde test cihazı tarafından uygulanır.



Şekil 2.6. Sabit genlikli gerilmenin zamanla değişimi

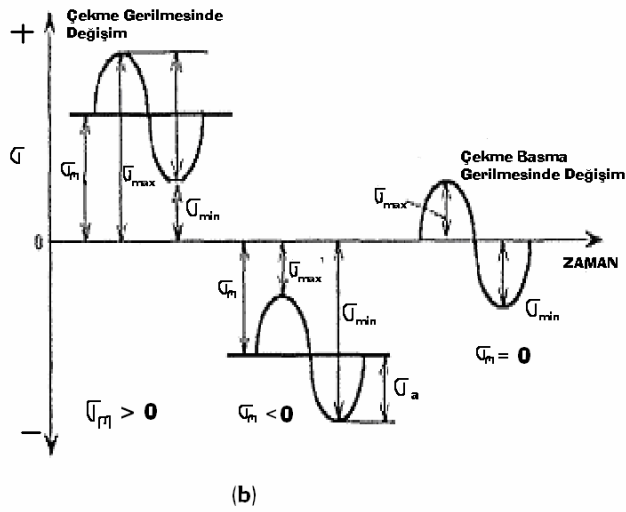
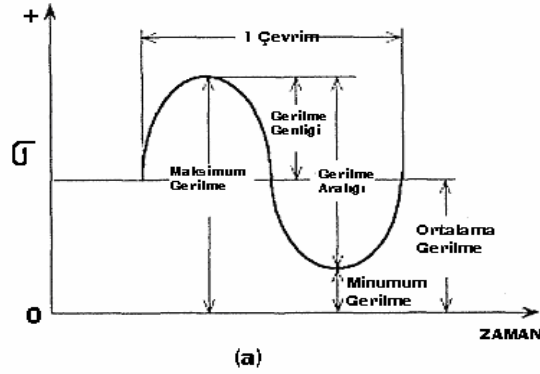


Şekil 2.7. Değişken genlikli gerilmelerin görünümü

Eksenel gerilmeli yorulma deneyi, burma gerilmeli yorulma deneyi ve birleşik gerilmeli yorulma deneyi olmak üzere gerilme tiplerine göre, deneyler üç sınıfta kategorize edilir. Eksenel gerilmeli yorulma deneyinde numuneye uzunluk eksenine boyunca değişen değerlerde çekme ve basma gerilmeleri uygulanır. Eğme gerilmeli yorulma deneyinde numuneye bir düzleme göre tekrarlanan eğme gerilmeleri uygulanabileceği gibi, dönme hareketi yapan numuneye tekrarlanan eğme gerilmeleri uygulanabilir. Burma gerilmeli yorulma deneyinde deney numunesine sabit bir eksene göre tekrarlanan burma gerilmeleri uygulanmaktadır. Yukarıda belirtilen farklı gerilme türlerinden en az ikisinin ya da daha fazlasının bir arada uygulandığı yorulma deneyleri ise birleşik gerilmeli yorulma deneyleri olarak adlandırılır [12]. Şekil 2.8.'de gösterilen yorulma deneylerinde uygulanan gerilmelerle ilgili terimler ve yorulma deneylerinde kullanılan bazı temel terimler aşağıdaki gibi değerlendirilebilir.

Yüklemeye Sayısı: Gerilme çevrim sayısı eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına denir ve çevrim sayısı N_f sembolü ile gösterilir.

Maksimum Gerilme : Uygulanan gerilmeler arasında cebirsel olarak en büyük değere sahip olan gerilmedir ve σ_{max} sembolü ile gösterilir. Değeri negatif, pozitif ya da sıfır olabilir.



Şekil 2.8. Yorulma deneyi ile ilgili temel terimler

- a) Yorulma deneyinde uygulanan gerilmeler ile ilgili temel terimler
- b) Yorulma deneyinde kullanılan gerilme örnekleri

Minimum Gerilme : Uygulanan gerilmeler arasında cebirsel olarak en küçük değere sahip olan gerilmedir ve σ_{min} sembolü ile gösterilir. Değeri negatif, pozitif ya da sıfır olabilir.

Ortalama Gerilme : Maksimum ve minimum gerilme değerlerinin aritmetik ortalamasına eşittir ve σ_m sembolü ile gösterilir. Ortalama gerilme 2.2. esitliğinde verilmektedir.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.2)$$

Gerilme Aralığı : Maksimum ve minimum gerilme değerleri arasındaki cebirsel farka eşittir ve $\Delta\sigma$ sembolü ile gösterilir. Gerilme aralığı 2.3. eşitliğinde verilmektedir.

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2.3)$$

Gerilme Oranı : Genellikle iki çeşit gerilme oranı kullanılır. En çok kullanılan gerilme oranı R ile gösterilir ve minimum gerilmenin maksimum gerilmeye oranı şeklinde ifade edilir [6].

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.4)$$

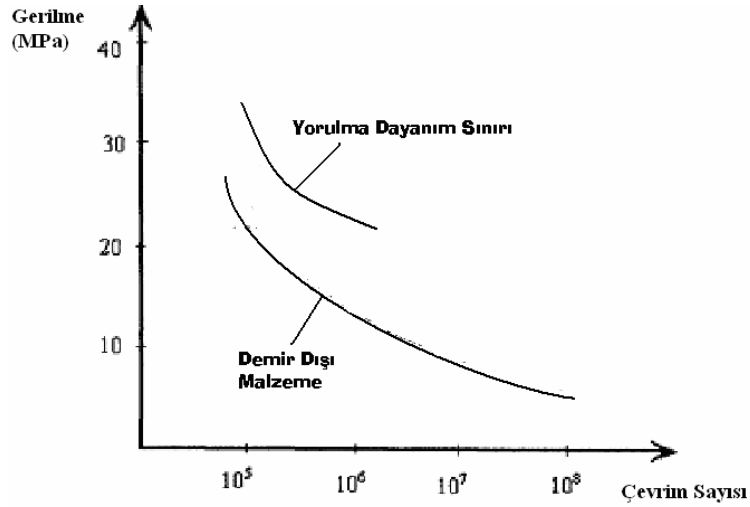
2.3.2. Hasara Kadar Geçen Sürenin Belirlenmesi

Malzemelerin belirli bir çevrim sayısı için emniyetli bir şekilde dayanabileceği gerilme sınırları, yorulma deneyleri ile belirlenir. Bu bilgiler gerilme-kırılma çevrim sayısı grafikleri ile gösterilir. Gerilme-kırılma çevrim sayısı grafiği yorulma bilgilerini belirtmede kullanılan en genel şekildir ve bu grafik S-N eğrisi ya da Wohler eğrisi olarak da bilinir. S gerilmeyi, N ise kırılma çevrim sayısını belirtir. S ile gösterilen gerilme parametresi olarak gerilme genliği, maksimum, minimum ya da ortalama gerilme olabileceği gibi gerilme oranı parametreleri de dikkate alınabilir [7].

Çevrim sayısı, gerilme değeri eğrisinin belirlenmesinde kullanılan süreçte uygulanan gerilme değerleri belirli bir R gerilme oranında ya da ortalama gerilme değerinde bir ya da iki numunenin 10^6 gibi kırılmanın olmadığı belirli bir kırılma çevrim sayısına kadar azaltılarak, her gerilme seviyesi için belirli kırılma çevrim sayıları belirlenir. Elde edilen kırılma olayının olmadığı en yüksek gerilme değeri yorulma sınır değeri olarak

alınır. Sonuçta Sekil 2.9.'daki gibi bir gerilme-kırılma çevrim sayısı grafiği ya da S - N grafiği elde edilmiş olur. Şekilden de görüldüğü gibi malzemenin kırılma olayı olmadan önce dayanabileceği gerilme çevrim sayısı, gerilme değerleri düştükçe artmaktadır. Demir ve alaşımlarında belirli bir çevrim sayısından sonra grafik yatay bir duruma gelmekte ve bu şekilde devam etmektedir. Gerilmenin bu değerine o malzemenin yorulma sınırı denir ve bu gerilmenin altındaki değerlerdeki gerilmelerde malzeme sonsuza kadar kullanımda kalabilecektir.

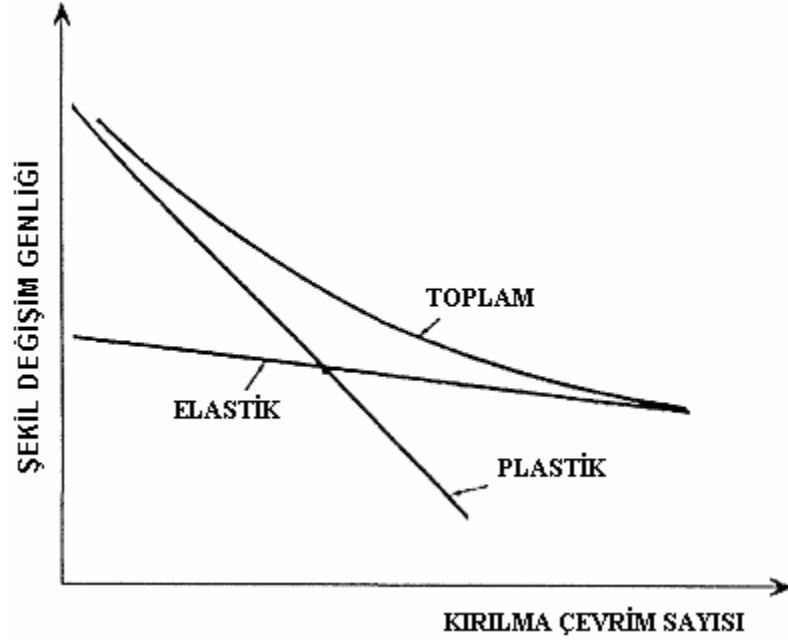
Eğri demir dışı malzemeler için sürekli olarak azalan bir durum göstermektedir ve bu malzemeler için herhangi bir yorulma sınırı yoktur. Bu malzemeler için yorulma sınırından ziyade yorulma mukavemetinden söz edilebilir.



Şekil 2.9. Kuvvet değişimi karşısında kırılma grafiği eğrisinin değişimi

Yorulma mukavemeti bir metalin belirli bir çevrim sayısı için maruz kalabileceği gerilme değerini ifade eder. Demir dışı metaller için 10^8 ya da 5×10^8 çevrim sayılarındaki yorulma mukavemet değerleri yorulma sınırı şeklinde tanımlanır [8]. S - N eğrileri, yorulma deneylerinin gerilme kontrollü olarak uygulanması ile

oluşturulur. Bu grafikler kırılma çevrim sayılarının 10^5 'ten büyük olduğu uzun ömürlü yorulma bilgilerini ifade etmek için kullanılır. Uzun ömürlü yorulma koşulları altında, malzemenin maruz kaldığı gerilmeler büyük ölçüde elastik olmakla beraber, yapıda bölgesel olarak plastik şekil değişimleri oluşmaktadır.



Şekil 2.10. Şekil değişimine giden yolda kırılma ömrünün eğrisi

Maruz kalınan gerilmeler, kısa ömürlü yorulma olayında, uzun ömürlü yorulma olayındaki gerilmelere göre büyük değerlerdedir. Kısa ömürlü yorulma bilgileri, gerilme kontrollü deneylerden ziyade şekil değişim kontrollü deneyler sonucunda elde edilen şekil değişim-kırılma çevrim sayısı ($\epsilon - N$) grafikleri ile gösterilir [7]. Şekil 2.10.'da şekil değişim genliği-kırılma çevrim sayısı grafiği gösterilmektedir. Şekil değişim genlikleri malzemede elastik ya da plastik şekil değişimi oluşturacak şekilde değiştirilebilir. ϵ sembolü şekil değişimini belirtmektedir.

2.4. Hasar Etkenleri

Malzemelerde yorulmaya etki eden faktörlerin başlıcaları aşağıda sıralanmış olup, bu faktörlerin haricinde faktörler de çeşitli kaynaklar tarafından incelenmiştir.

- a) Malzeme bileşiminin ve mikro yapısının etkisi
- b) Yüzey özelliklerinin etkisi
- c) Çentik etkisi
- d) Gerilmelerin etkisi
- e) Korozyonun etkisi
- f) Isıl etki

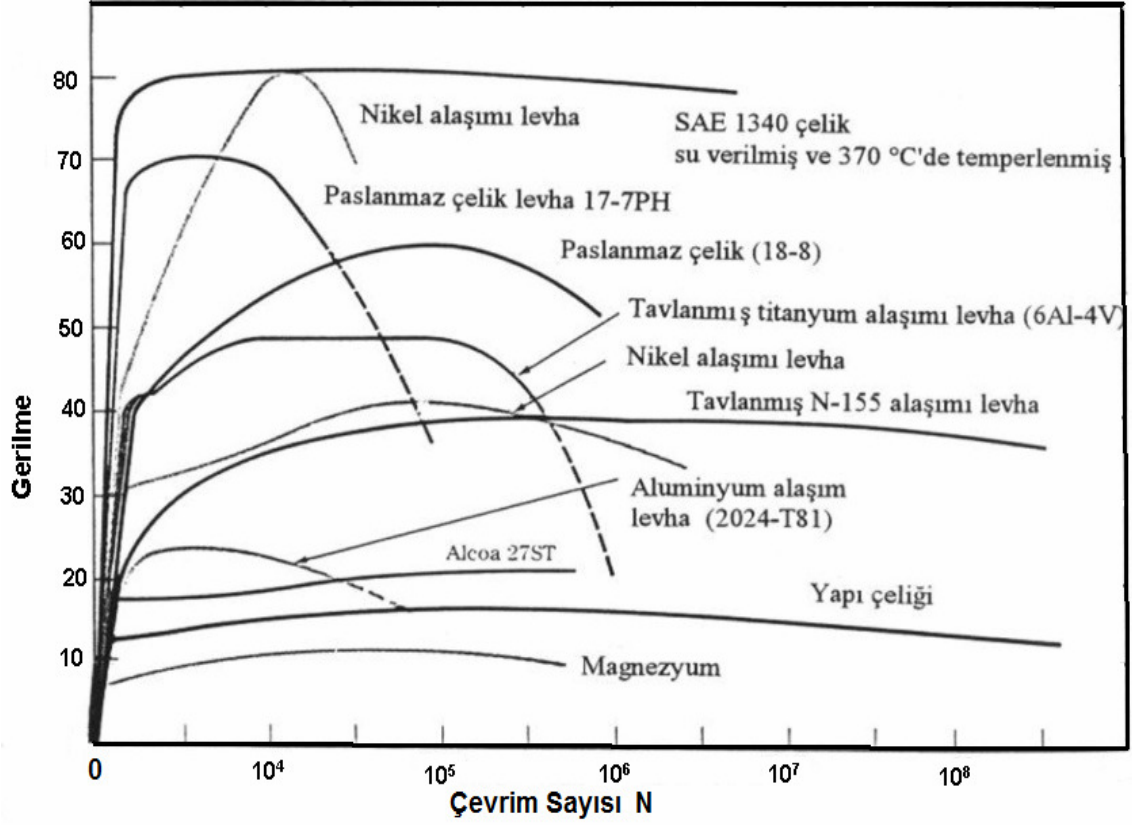
2.4.1. İçyapı Etkileri

Yapının imalat kalitesi, kimyasal bileşimi, cinsi vb. malzemenin yorulma dayanımını etkiler. Bu etki, malzemenin kimyasal bileşiminin çekme mukavemetini etkilemesi ile ilgilidir [8]. Genellikle malzemenin statik çekme dayanımı arttıkça malzemenin yorulma dayanımının da arttığı kabul edilir. Malzeme yapısında alaşımlar kullanılarak malzemenin statik çekme dayanımının artırılması ile yorulma dayanımı da artırılabilir. Şekil 2.11.'de değişik malzemelere ait düzlemsel eğme gerilmeleri altında elde edilen S-N eğrileri ile ifade edilmiştir.

Statik çekme dayanımı ve sertliği uygun su verme işlemleri uygulanarak ve alaşım malzemesi kullanılarak artırılan çeliklerin yorulma dayanımının arttığı bir başka değerlendirme olarak şekil 2.11.'de verilmiştir.

Yorulma ömrü üzerinde tane yapısı ve iç yapı hatalarının önemli etkileri olduğu bilinen bir gerçektir. Metal malzemelerde yorulma hasarı, genellikle dislokasyon hareketleri sonucunda oluşan kalıcı şekil değişimlerinden kaynaklandığından dolayı, dislokasyon hareketlerini etkileyen faktörler malzemenin yorulma özelliklerini de etkileyecektir. Dislokasyon hareketleri, yapı içerisindeki çökeltilerden, kalıntılardan, tane sınırlarından

etkilenir. Kalıntılar, parçacıklar, tane sınırları mikroskobik gerilme yığılmalarına neden olarak, yorulma çatlağı oluşumuna yol açabilirler [8].



Şekil 2.11. Çok kullanılan malzemelerin gerilme-ömür grafikleri

Çeşitli imalat işlemleri, metal ve alaşımlarının iç gerilme dağılımını, kristal yapısını, dislokasyon hareketlerini etkileyerek, malzemelerin mekanik özelliklerinde değişmelere sebep olmaktadır. Isıl işlemler, haddeleme ve ekstrüzyon işlemleri sonucunda metal malzemelerin tane boyut ve şekli değişmektedir. Tane boyutunun küçülmesi, yorulma mukavemetini artırmaktadır. Maruz kalınan gerilmelerin büyük seviyelerde olduğu kısa ömürlü yorulma koşulları altında, çoğu metalin yorulma ömrü tane boyutundan bağımsızdır. Buna karşın gerilmelerin daha düşük seviyelerde olduğu uzun ömürlü

yorulma koşulları altında tane boyutunun küçülmesi, çoğu metalin yorulma ömrü pozitif yönde etkilemektedir.

Kompozit malzemelerin heterojen ve anizotropik yapıda olanlarında yorulma olayı metal malzeme yorulmasından bir çok yönden farklılık gösterir. Homojen yapıya sahip izotrop metal malzemelerde yorulma hasarı sonucunda Şekil 2.12.'deki gibi açıkça tanımlanabilen bir çatlak meydana gelirken, kompozit malzemelerde durumu tespit edebilmek çok daha zordur.



Şekil 2.12. Oluşan çatlak için genel bir örnekleme

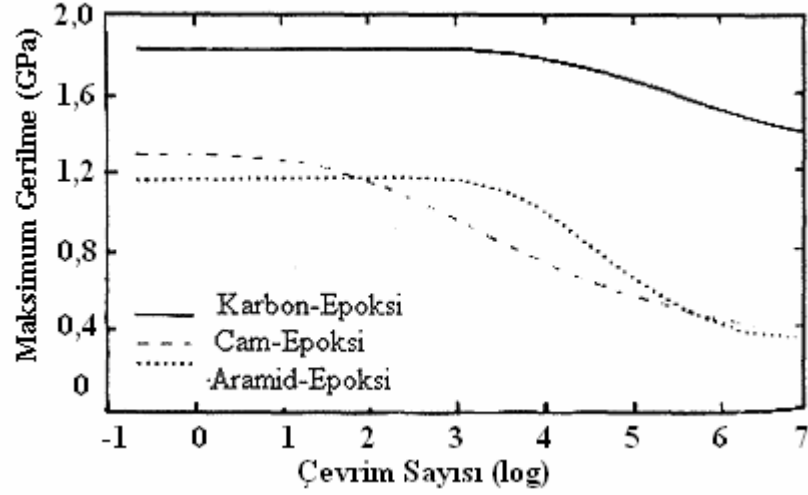
Metal malzemeler, kompozit malzemelere göre yapılarında daha az hata bulundurmaktadır. Kompozit malzemelerin kırılma olayının öncesindeki tolere edebilecekleri kritik hasar ya da çatlak boyutları ve bu boyutlara ulaşılması için gereken çevrim sayıları metal malzemelere göre daha büyüktür. Kompozit malzemelerde yorulma hasarı elyaf kırılmaları, matris çatlakları, elyaf matris ayrılmaları, tabaka ayrılmaları şeklinde oluşur. Kompozit malzemelerin yorulma davranışları, kompozit malzemedeki elyaf ve matris malzemenin özelliklerine, elyaf miktarına, elyafların yönüne bağlıdır. Elyafli kompozit malzemelerin yorulma davranışında elyaf geometrisi,

uygulanan yük biçimi önemli rol oynar. Bu yapılarda en yüksek mukavemet elyaf yönünde elde edilir. Şekil 2.13.'de tek yönlü elyafli bir kompozit yapıda yorulma hasarı sonucunda oluşan hasar tipleri verilmektedir. Tek yönlü elyafli bir kompozit yapıda yorulma hasarı sonucunda delinme, fiber kopması, delaminasyon oluşumu gibi etkiler meydana gelebilir. Yorulma çatlakları elyafla karşılaşarak matris ve elyaf malzeme arasına dönebilir.



Şekil 2.13. Delinme, fiber kopması ve delaminasyon oluşumunun genel görünüşü

Asıl malzemede bulunmayan, elyaf ve matris malzeme kullanımının kompozit malzeme yorulmasına etkisi Şekil 2.14.'deki grafikte gösterilebilir. Şekil 2.14'de görüldüğü gibi statik mukavemeti cam ve aramide göre daha yüksek olan karbon elyaf malzemenin kullanıldığı karbon-epoksi kompozit malzemesinin yorulma dayanımı cam-epoksi ve aramid epoksiye göre daha dayanıklıdır.



Şekil 2.14. Karbon, cam ve aramid epoksinin etki eğrileri

Statik mukavemeti artırılan karbon yüksek tokluktaki epoksiden oluşan kompozit malzemenin büyük çevrim sayılarında yorulma dayanımı karbon-standart epoksiye göre daha kötüdür. Bunun nedeni yalnız daha yüksek tokluktaki matris malzemelerin zayıf performansları değil kompozit malzemelerde yorulma hasarı sonucunda meydana gelen elyaf matris malzeme ayrılması gibi durumlardır [13].

2.4.2. Pürüzlülüğün Tesiri

İmalat hataları yorulma olayında en önemli etkenlerden biridir. Özellikle de çatlaklar, yüzeydeki bir pürüzde, bir çentikte ya da ani kesit değişimlerinin olduğu yerden başlar. Yüzeyde başlayan çatlağın kendisi, daha sonra çentik etkisi göstererek gerilme yığılmasının oluşmasına ve çatlağın daha hızlı ilerlemesine yol açar. Bu nedenle malzemenin yorulma dayanımını arttırmak, büyük ölçüde yüzeyde çatlak oluşumunun önlenmesiyle olur. Çatlak oluşumunun engellenmesi yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ile doğru orantılıdır.

Malzemenin yüzeyine yapılacak mekanik bir işlemin çok iyi hesaplanması gerekmektedir. Yorulma olayı yüzeyle ilgili olduğundan yüzey özelliklerinin ve yüzey düzgünlüğünün değişmesine sebep olacak bir işlem, malzemenin yorulma özelliklerini de değiştirecektir. Yüzey düzgünlüğünün ve yüzey sertliğinin artırılması ile malzemenin çatlak oluşmasına karşı direnci arttırılacağından yorulma dayanımı arttırılmış olur. Çelik malzemelerde iç yapı değişmeden uygulanan sementasyon, nitrürasyon ve benzeri yüzey sertleştirme işlemlerinin yorulma dayanımı açısından pozitif etki sağladığını söylemek mümkündür.

Mekanik işlemlerin yanı sıra soğuk dövme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi soğuk kalıcı şekil verme teknikleri meydana getirdikleri tane yönelmesinden dolayı, malzemelerde yöne bağlı mekanik özellikler oluşturur. Yorulma dayanımı yönlendirilmiş kısımlarda, diğer yöne göre daha yüksektir. Malzeme işlenmesi aynı zamanda çukur, boşluk gibi mikroskobik kusurların oluşmasına neden olabilir. Bu kusurlar gerilim arttırıcı gibi davranarak çatlak başlangıcı oluşumu için potansiyel bölgeleri oluşturabilirler. Isıl işlem, soğuk ve sıcak işlemler, yüzey kaplaması gibi işlemler yorulma ömrünü etkiler. Örneğin imalat işlemleri, parça yüzeyinde kalıntı gerilmeler oluşturabilir. Çekiçleme, soğuk haddeleme ve statik ön yük uygulanması gibi işlemler yüzeyde basma kalıntı gerilmeleri oluşturmak için kullanılan işlemlerdir. Malzeme yüzeyinde oluşturulan basma kalıntı gerilmeleri yorulma ömrünü artırırken, çekme yönündeki kalıntı gerilmeleri yorulma ömrünü olumsuz yönde etkilemektedir.

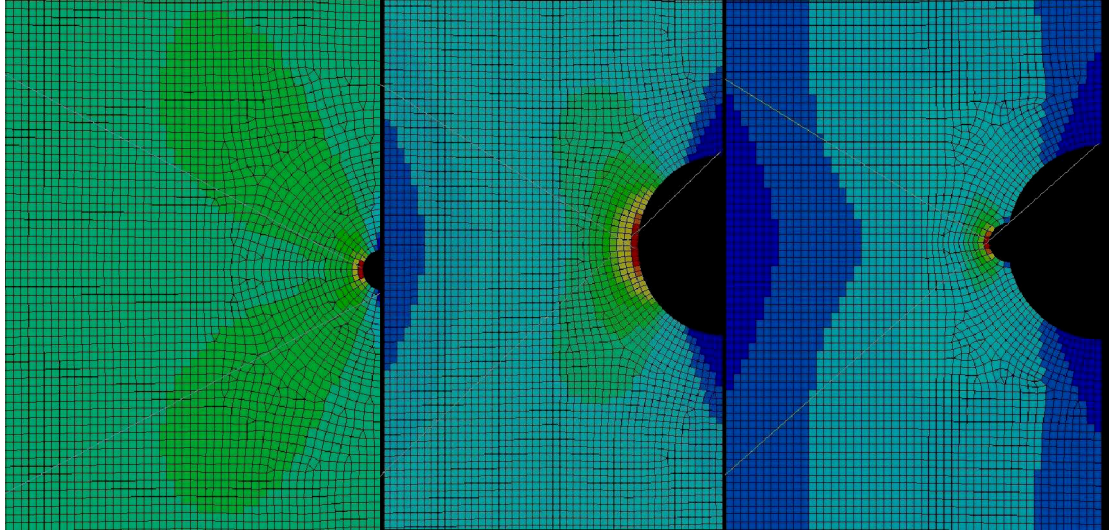
2.4.3. İmalat Hataları

İmalat işlemleri yüksek teknolojik imkanlar kullanılarak yapılırsa malzeme yüzeyleri ve iç yapı özellikleri o derece mükemmelere yakın olur, buna bir de gerilme yığılmalarının tasarım aşamasında iyi planlama ile dağıtılması eklenirse malzemede imalat hataları indirgenmiş olur. Yorulma çatlakları bilindiği gibi genellikle delik, çentik, pürüz gibi yüzey süreksizlerinin oluşturduğu gerilme yığılmalarının olduğu bölgelerden başlar. Parça yüzeyinde çentik, delik ve ani kesit değişimlerinin bulunması yorulma dayanımı

ve yorulma ömrünü büyük ölçüde azaltmaktadır. Bu tür süreksizliklerin etkisi çentik etkisi şeklinde tanımlanabilir.

Çentik etkisi malzeme üzerinde bulunan çentiğin şekline ve boyutlarına bağlı olarak değişecektir. Sürekliliğin bozulduğu bu bölgelerde gerilmeler uygulanan gerilmelere göre daha büyüktür. Parça yapısındaki bu tür süreksizlikler gerilme yığılmalarına dolayısıyla çatlakların başlamasına neden olur. Şekil 2.15.'de malzeme yapısındaki bir çentik etkisiyle meydana gelen gerilme yığılması değişimi gösterilmektedir[8].

Nominal gerilmelerin çentik çevresinde maksimum değerini aldığı Şekil 2.15.'de açıkça görülmektedir. Bu gibi gerilmelerin yoğunlaştığı kısımlarda, yorulma çatlaklarının oluşma olasılıkları daha fazladır. Malzemelerde ani kesit daralmaları, yağ delikleri, yolluk, vida dişi ve benzeri kısımlar daima çentik etkisini tetiklerler.

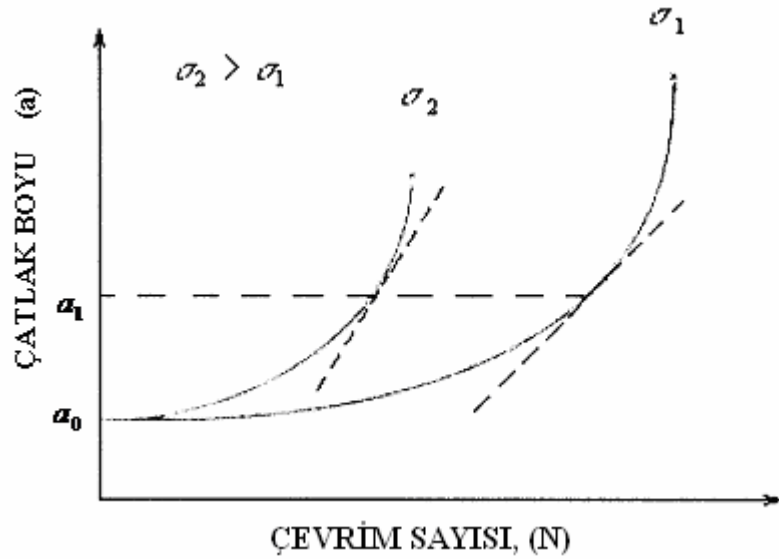


Şekil 2.15. İmalat hataları ve gerilme yığılmaları

2.4.4. Çeşitli Kuvvetler

Malzemenin ömrünü, yorulma olayında gerilme türü, büyüklüğü, yönü ve oranı vb. bileşenler etkilemektedir. Şekil 2.16.'da üzerinde a_1 boyunda bir çatlak bulunan bir malzemeye etkiyen iki farklı büyüklükteki gerilme yükü altında çatlak boyunun, çevrim sayısına bağlı olarak değişimi verilmektedir. Şekil 2.16.'dan görüldüğü gibi a_0 başlangıç boyutundaki bir çatlak daha büyük gerilmeye maruz kalması durumunda, a_1 boyutuna daha küçük çevrim sayısında varılmaktadır.

Malzemenin yorulma dayanımı özelliklerini, aynı tür gerilmeler için ortalama gerilme, gerilme genliği ve gerilme oranı değerleri etkilemektedir. Şekil 2.17.'de farklı ortalama gerilme değerleri için elde edilen S - N eğrileri verilmektedir. Ortalama gerilme değeri arttıkça malzemenin belirli bir çevrim sayısı için dayanabileceği gerilme genliği azalmaktadır. Ortalama gerilmenin, özellikle uzun ömürlü yorulma olayında önemli etkisi vardır. Yüksek sıcaklıklarda, ortalama gerilme ciddi bir hasara yol açabilen sürünme olayının oluşmasına neden olmaktadır.

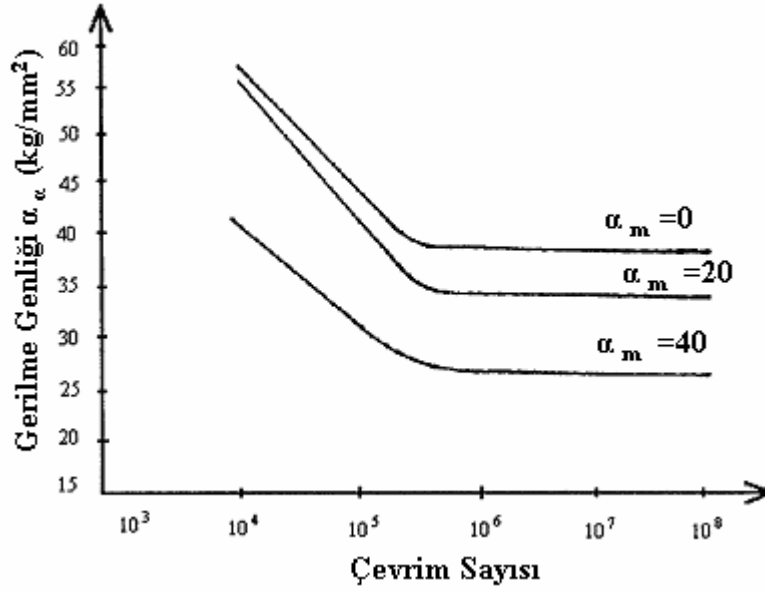


Şekil 2.16. İki farklı kuvvet uygulamasında oluşan hasar eğrileri

En düşük gerilmenin, maksimum gerilme değerine oranı olan R gerilme oranının yorulma olayına etkileri Şekil 2.18.'de gösterilmektedir. Gerilme oranı arttıkça malzemenin belirli bir çevrim sayısı için dayanabileceği gerilim genliği azalmaktadır. Belirli bir gerilme genlik değeri için gerilme oranının artmasıyla yorulma hasarı daha erken oluşmaktadır, yani gerilme oranının artması ile çatlak ilerleme hızı yükselir.

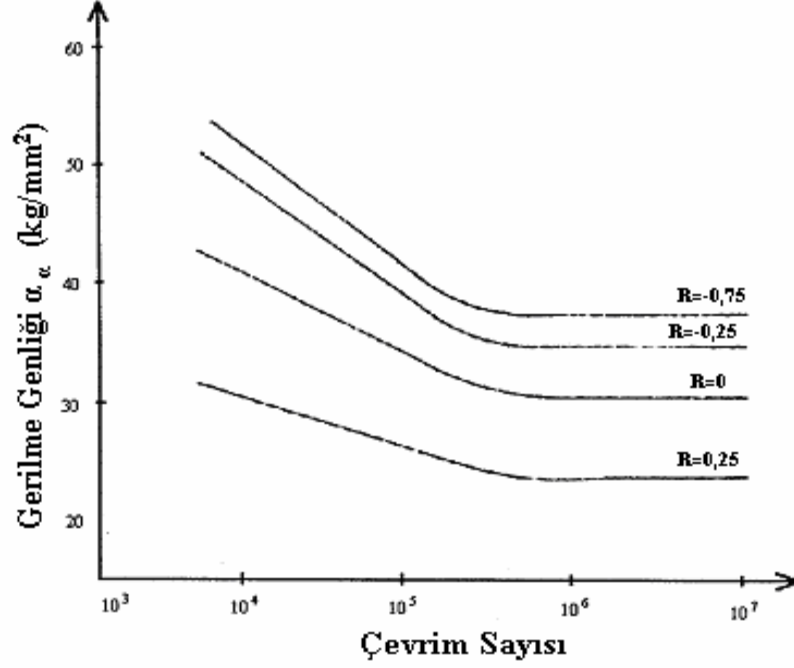
Kullanımda olduğu sürece malzemelere etkileyen gerilmeler yorulma deneylerindeki gibi belirli tipte, sabit genlikli ya da sabit peryotlu değildir. Komponentler zaman zaman aşırı yüklerle, çok eksenli gerilmelere maruz kalabilir. Aşırı gerilmeler yorulma ömrünü azaltacaktır [12].

Küçük çatlaklar aslında büyük gerilmelerin sonucunda oluşur fakat, önemli olan bu oluşumdan sonra malzemeye etkileyen küçük şiddetteki gerilmelerin bu çatlakları ilerleterek kırılmaya kadar götürmesidir. Yorulma hasar süreci, yükleme sırasında karşılaşılan sık olmayan aşırı gerilmelerden etkilenir. Bu etki özellikle yapısında çatlak bulunan komponentlerde önemlidir. Çekme yönünde düşük zaman aralıklarında uygulanan aşırı gerilmeler çatlak ilerlemesini geciktirme şeklinde etkide bulunmasına rağmen, basma yönündeki aşırı gerilmeler çatlak ilerlemesini hızlandırma şeklinde bir etkiye yol açabilirler.



Şekil 2.17. Ortalama gerilme çeşitleri için kuvvet ömür grafikleri

Farklı kalınlıktaki malzemeler kullanıldıkları alanda çalışmalarını sırasında çok eksenli ya da birleşik gerilmelere maruz kalabilirler. Parça kalınlığının ani değiştiği yerlerde gerilme yığılmaları meydana geleceğinden, buralardaki gerilme değerleri maruz kalınan ortalama gerilme değerinden büyük olabilir. Yani bu kısımlarda yerel plastik şekil değişimleri meydana gelir ve malzemenin gevrekliği artar. Bu kısımlarda mikro çatlak oluşma ve ilerleme olasılığı artar. Parçanın mukavemetini azaltan bu tür gerilme yığılmalarını önlemek için ani kesit daralmalarından uzak durulmalıdır [12].



Şekil 2.18. Kuvvet çeşitleri için gerilme ömür grafikleri

2.4.5. Malzeme Kayıpları

Malzeme kayıplarında özellikle çevrenin etkisi söz konusu ise buna korozyon diyebiliriz. Korozyonda malzeme kayıplarının yanı sıra kimyasal bir etkileşim de mevcuttur. Korozyon olayının kimyasal etkisi ile yorulma olayının mekanik etkisi ile yorulma olayının mekanik etkisinin aynı anda oluşmasına ise korozyon yorulmasının bir göstergesidir.

Malzeme kayıpları, malzemelerin çevrimsel gerilmelere ve korozif çevre koşullarına maruz kalmaları sonucunda oluşan ve ilerleyen çatlaklar sonucu oluşan korozyon yorulması ve buna bağlı hasarlardır. Korozyon yorulması olayının etkisi korozyon olayının ve yorulma olayının ayrı ayrı etkisinden daha fazladır. Korozif çevre koşullarının etkisi ile çatlakların başlangıcı ve ilerleme aşamaları daha hızlı olacaktır. Korozyon yorulmasında meydana gelen ilk aşama, malzemenin yüzey kısımlarında bozulmaların oluşmasıdır. Yüzey kalitesinin bozulması sonucunda yüzeyde bir

zayıflama meydana gelecektir, meydana gelen bu zayıflama yüzeyde mikro çatlakların oluşmasına olanak sağlar. Bu nedenle yorulma hasarının hem çatlak başlangıç hem de çatlak ilerleme aşamaları, oluşan korozyon olayının etkisiyle hızlanır. Yorulma çatlak başlangıç aşaması süresince, korozyon yorulmasının temel mekanizması, metal yüzeyini korozif çevrenin bozması ve parça yüzeyinde oksit film tabakasının oluşmasıdır. Oluşan bu oksit tabakası genellikle bir koruyucu tabaka gibi görev alarak metalin daha fazla korozyona uğramasını engeller.

Uygulanan sürekli yükler bu tabakada bölgesel çatlaklar oluşturur ve metalin tekrar çevre ile temasını sağlar. Korozyon yüzey düzgünlüğünü bozduğundan gerilme yığılımlarının oluşmasına sebebiyet verir.

Çevre koşullarının malzemelerin korozyona uğraması ve korozif yorulmaya maruz kalarak ömürlerinin azalması üzerinde önemli bir etkisi mevcuttur. Korozif çevre koşulları altında yorulma olayının meydana gelmesi için gereken gerilme değerleri, normal koşullardakine göre daha düşük değerlerdedir. Bu etki malzeme-çevre karakteristiklerine bağlı olarak değişir. Korozif çevresel etkiler, çatlak ilerleme hızını ve çatlak başlama, oluşma olasılığını etkiler. Korozif ortamda yorulma dayanımı, yük frekansına önemli derecede bağlıdır. Yorulma dayanımı çevrim frekansının azalması ile düşer. Bu etki özellikle saniyede 10 çevrimden daha düşük frekanslı çevrimlerde önem kazanmaktadır. Düşük frekanslı çevrimlerde çatlakın daha çok çevre koşullarına maruz kalması ile çatlak daha çabuk hareket eder.

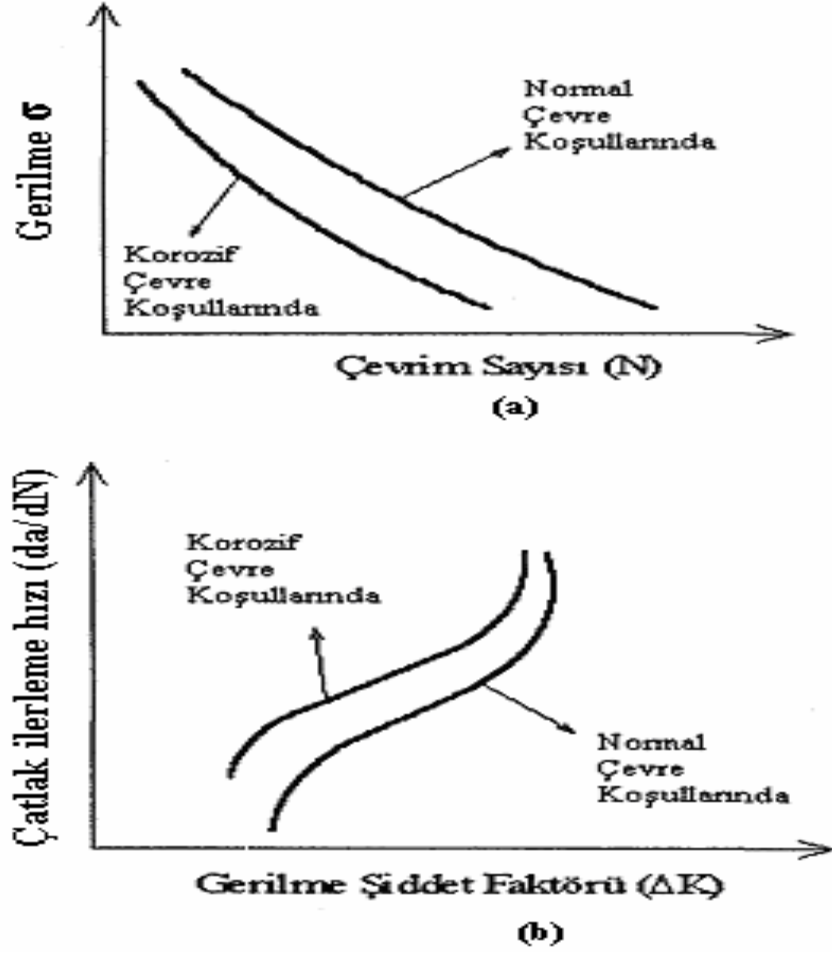
Uygulanan gerilmelerdeki çekme ve basma durumlarında, malzemelerde yeni oluşmuş kayma basamağının malzemenin yüzeyi üzerinde oluşmuş bir oksit tabakası ile etkileşime girmektedir. Çekme basma gerilme çevriminin basma yükünün uygulanan bölümünde, kayma aynı düzlemde fakat ters yönde gerçekleşir ve oksijen atomları, kütlenin kristal yapısı içersine girer. Bir sonraki çevrimde bu süreç tekrarlanır ve kristal yapı içersine, daha sonra kayma bandı boyunca yayılabilecek, daha fazla oksijen atomu çekilir.

Oksijen atomlarının kayma bantlarının içine ya da yanına girerek kimyasal içine çekiliş meydana gelir. Böylece kristaldeki kalıcı kayma bantlarının zayıflamasına yol açarak, sonunda çatlak oluşumuna ve kırılma olayına sebep olur. Burada, oluşan oksijen tabakası çatlağın oluşumuna sebep olmaz fakat yorulma çatlağının daha erken oluşmasında ve ilerlemesinde önemli etkide bulunur [12].

Malzeme kayıpları ile korozif yorulmaya neden olan çevre koşullarının çevrim sayısı şekil 2.19.'da gösterilmiştir. Doğal olarak şekil 2.19a.'da da görüldüğü üzere korozif çevre koşullarına maruz kalındığında, yorulma hasarının meydana gelebilmesi için gereken gerilme değerleri, normal çevre koşullarındaki gereken gerilme değerlerine göre daha düşük değerlerde olmaktadır.

Belirli bir gerilme şiddet faktörü değeri için malzemede oluşan yorulma çatlağının korozif çevresel koşullarının etkisi altında normal çevre koşullarına göre daha hızlı ilerlediği şekil 2.19.b.'de görülmektedir.

Yorulma olayına benzer şekilde malzeme kayıpları ve korozyon yorulması, yüzeydeki kusurlardan, çukurlaşmalardan ya da düzensizlikler başlayarak ilerler. Daha sonra farklı noktalardan gelişir ve taneler arasından geçerek ilerler ve en sonunda malzemenin kırılmasına neden olur.



Şekil 2.19. Uygun olmayan koşullarının malzeme ömrüne etkisi

a) Gerilme çevrim sayısı eğrisine etkisi b) İlerleme sürecine etkisi

2.4.6. Isıl Etki

Yorulma durumları incelendiğinde bir bileşenin de çalışma ortamının sıcaklığı olduğu ortaya çıkmıştır. Altıncı bölümde de bahsedilecek olan sıcaklık etkisi malzemenin ömrüne oldukça etki eden parametrelerden biridir. Oda sıcaklığının altında yapılan yorulma deneylerinde, sıcaklık düştükçe yorulma dayanımı artmaktadır. Fakat, sıcaklığın oda sıcaklığının altına inmesi malzemenin çentik etkisi hassasiyetini arttırmaktadır. Oda sıcaklığının üstünde yapılan deneylerde sıcaklık yükseldikçe

yorulma dayanımı düşmektedir. Deney sıcaklığının belirli değerlere yükselmesiyle, ortalama gerilmenin mevcut olması durumunda, meydana gelen sürünme olayı daha etkili hale gelmektedir. Bu durumda meydana gelen kopma olayı daha çok sürünme olayı sonucunda gerçekleşecektir. Bu iki olayı birbirinden ayıran özellik meydana gelen kırılmanın türüdür. Yorulma olayında kırılma tane içersinden, sürünme olayında ise kırılma tane sınırlarında meydana gelmektedir.

Her malzemenin yorulmaya karşı dirençli olduğu farklı sıcaklık değerleri vardır. Bu direncin etkisi, sıcaklığın artışıyla azalmaktadır. Ancak bu olay her malzeme için aynı hızda ilerlemez. Fakat sıcaklıkla yorulma arasındaki kesin ilişki, malzemeye ve bu malzemenin maruz kalacağı sıcaklığa bağlı olarak oldukça geniş ölçüde değişir. Sıcaklıktaki artış metallerin yorulma direncini azaltır, yorulma çatlak ilerleme hızını yükseltir.

Atomların ısı titreşimleri sıcaklık arttıkça artar ve atomların bir kısmı içinde bulunduğu bir konumdan diğer bir konuma atlayarak yer değiştirir. Atomsal yayılım ya da difüzyon denilen bu olayda önce atomun çevresi ile arasındaki bağlar kopar, sonra atomlar arası boşluklardan geçer ve yeni konumda tekrar çevresi ile bağ kurar. Atomların kütle içersindeki yayılımı, bir kristal kafesindeki boş kafes köşesine komşu atomlardan birinin hareket etmesi, arayer atomu olarak adlandırılan kafes yapıdaki fazla atomun, atomlar arasından geçerek hareket etmesi şeklinde olabilir. Atomsal yayımla yapıdaki atomlar daha düşük enerjili bir yapı oluştururlar. Yüksek sıcaklıkta yorulma olayına sebebiyet veren yapının kararlılığı bozulur, dislokasyon hareketleri kolaylaşır, dislokasyon tırmanması ve çapraz kayma olayları oluşabilir [12]. Atomsal yayılım sonucu tane sınırlarında, yabancı maddelerin çevresinde oluşan boşluklar gerilme yığınlarına sebep olarak yorulma çatlağının başlamasına neden olabilirler.

Malzeme kayıplarına sebebiyet veren oksitlenme ve korozif çevre koşullarının varlığı yüksek sıcaklıktaki yorulma çatlak başlangıcını önemli ölçüde etkiler. Çevrimsel şekil değişimindeki kayma hareketleri sonucunda yüzeyde oluşan oksit tabakası tekrarlı olarak bozulur ve oksijen atomları, kütle kristal yapısı içersine girer. Meydana gelen oksidasyon olayı çentik etkisi yaparak sonunda çatlak oluşumuna yol açabilir. Diğer

yandan yapı içersine giren oksijen atomları tane sınırlarının gevrekleşmesine yol açarak hareket kabiliyetini sınırlandırır. Bu olay, yüksek sıcaklıklarda çevrimsel yükleme sırasında teneler arası yorulma çatlaklarının oluşmasına neden olabilir.

Uygulanan çeşitli ve sürekli sıcaklık değişimlerinden dolayı, yorulma olayı ısıl gerilme değişimlerine maruz kalınması sonucunda ısıl yorulma şeklinde meydana gelebilir. Isıl yorulma çatlakları alternatif genleşme ve büzülme olaylarını oluşturan tekrarlı ısıtma ve soğutma çevrimleri sonucunda oluşur. Isınma soğuma çevrimleri sırasında, metal soğuduğunda büzülür ve büzülme olayı sonucunda serbestçe hareketinin engellenmesi durumunda malzeme üzerinde yorulma çatlaklarının oluşumuna sebep olabilecek çekme kalıntı gerilmeleri oluşabilir [13].

3. İMALAT TERCİHLERİ ve BUNLARIN DAVRANIŞ EĞİLMELERİ

3.1. Malzeme Seçim Kriterleri

Uçaklarda kullanılan gaz türbinli motorların başlıca elemanları; fan, kompresör, yanma odası ve egsos bölümleridir. Ancak motor içersindeki termodinamik etkilerden dolayı soğuk kısım (fan, kompresör) ve sıcak kısım (yanma odası, türbin ve egzoz) olarak iki kategoride değerlendirilir. Atmosferden motora alınan hava, yakıt ile karıştırılarak yanma odasında yakılır. Yanma odasındaki yanan gazların sıcaklık etkisi yanma odasından sonraki tüm motor bölümlerini etkiler. Motor içersinde basıncın maksimum olduğu yer kompresör çıkışı, sıcaklığın maksimum olduğu yer ise yanma odası çıkışı ya da türbin girişidir. Bu nedenle genel anlamda soğuk kısım parçalarının basınç yüklerine karşı dayanıklı olması gerekirken, sıcak kısım parçalarının da ısı etkilerine dayanıklı malzemelerden üretilmesi mecburi bir isterdir [14].

Gaz türbinli motor malzemelerinin imali için bir çok parametre hesaba katılmalıdır. Bu parametlerin başlıcaları ise; yüksek sıcaklıklara dayanıklılık, statik ve dinamik yüklere, yorulma olayına dayanıklılık, korozyona dayanıklılıktır. Ayrıca hafiflik, maliyet, tedarik kolaylığı, üretilebilirlik özellikleri de önemli unsurlardır. Bu özellikler doğrultusunda her bir komponent için çalışma şartlarına uygun olan malzeme seçilmelidir. Bu işlem tasarım safhasında yapılır. Tasarım safhasında ilk önce komponentten beklenen performans özellikleri belirlenir. Bu beklentiler doğrultusunda komponentin serviste karşılaşacağı gerçek çalışma koşullarına, karşılaşacağı hasar mekanizmalarına göre uygun malzeme seçilir. Daha sonra bu malzemelerin yapılan tasarıma uygunluğu, yapılan malzeme testleriyle ve komponent testleriyle kontrol edilir ve zamana bağlı olarak denetlenir [15].

Malzeme özellikleri olarak her bir bölüm farklılık gösterebilir. Bir türbin palesi ile fan palesi göz önüne alınırsa, fan palelerinde genellikle titanyum alaşımları kullanılır. Titanyumun akma mukavemeti, elastik modül ve kırılma tokluk özellikleri iyidir. Kullanılacak olan fan malzemesi tekrarlı yüklerden kaynaklanan yorulmaya, yabancı

maddelerin çarpması nedeniyle darbe hasarına, yüzey aşınmasına ve korozyona karşı dayanıklı olmalıdır. Bir motorun en sıcak kısmı olan türbin palesi için bazı malzeme özellikleri gereklidir. Türbin paleleri, yanma odasından çıkan sıcak gazlara ve bu gazların eğme yüklerine ve dönme hareketinden kaynaklanan atalet yüklerine maruz kalır. Bu çalışma ortamı sürünme, yorulma ve oksidasyon direnç özelliklerini gerektirir. Çalışma ortamlarının böylesine zor olduğu türbin paleleri için Alüminyum alaşımlı Titanyum ve nikel esaslı alaşımlar tercih edilmektedir [16].

Üretilen motorlar incelendiğinde gaz türbinli motorlarda alüminyum alaşımları, titanyum alaşımları, alaşım çelikleri, nikel esaslı ve kobalt esaslı süper alaşımlar ve kompozit malzemeler gibi metal olmayan malzemeler kullanılır. Bu malzemelerin genel özellikleri ve jet motorlarında kullanıldığı parçalar devam eden paragraflarda daha ayrıntılı olarak ifade edilecektir.

250 °C seviyelerindeki sıcaklıklardaki uygulamalarda alüminyum alaşımları tercih edilmektedir. Düşük yoğunluk ve iyi mukavemet - ağırlık oranı ile dövme alüminyum alaşımları, düşük ısı ve orta seviyede mukavemet özelliklerinin öncelikli olduğu kompresör rotor ve muhafazalarında, hava alık kısımlarında ve aksesuar kısımlarında yaygın olarak tercih edilmektedir.

Düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve korozyon direnç özelliklerinden dolayı titanyum alaşımları jet motorlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşınmaya karşı dirençleri düşüktür. Sürünme olayı nedeniyle sıcaklık açısından kullanım sınırlamaları vardır. Titanyum ve titanyum alaşımları yüksek performanslı motorların aksenel akışlı kompresör rotorlarında, palelerinde, fan muhafazalarında, fan palelerinde, kompresör diskleri gibi jet motorlarının soğuk kısımlarında kullanılmaktadır. Titanyumun maliyeti yüksek olup, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet özellikleriyle 528 °C değerindeki sıcaklıklara kadar dayanabilmektedirler.

Gaz türbinli motor parçalarında kullanılan çelik alaşımları, yüksek krom, yüksek nikel ve demir esaslı alaşımlardan ve düşük karbonlu alaşım çeliklerinden oluşur. Maliyetlerinin düşük olması, imalatının kolay olması ve iyi mekanik özelliklerinden

dolayı düşük alaşımli çelikler kompresör paleleri ve kanatçıkları, aksesuarlar, yapısal parçalar gibi motorun dönen ve sabit parçalarında yaygın olarak kullanılır. Düşük alaşımli çelikler 538 °C sıcaklığa dayanabilirken, yüksek nikel, krom, demir esaslı alaşımlar 677 °C'ye kadar kullanılabilir. Demir esaslı alaşımlar yüksek mukavemetli, aşınmaya karşı dirençlidir. Ayrıca ham malzeme maliyeti düşük ve yorulma dayanımı yüksek malzemelerdir. Korozyona karşı dayanımlarının kötü olması ve ağır olmaları onların tercih edilmemesinde önemli etkenlerdir [17] .

649 °C ile 982 °C sıcaklıklar arasında nikel esaslı süper alaşımlar kullanılabilir. Nikel esaslı alaşımların çoğunda hiç demir yoktur, ya da çok az demir vardır. Yaşlandırma sertleştirilmesiyle yüksek sıcaklık mukavemetleri artırılabilir. Bunun yanında uzun süreli sürünme - kırılma mukavemetleri, yüksek çekme ve akma mukavemetleri ve sünekliklerinin iyi olması bu alaşımların karakteristik özellikleridir. Nikel esaslı alaşımlar yüksek mukavemetli, yüksek sıcaklıklara, aşınmaya, oksidasyona, korozyona dirençli malzemeler olmalarına karşın maliyetleri yüksektir ve ağırdırlar. Nikel alaşımları kompresörün yüksek basınçlı kademelerinde ve türbin rotorları, milleri paleleri gibi motorun sıcak kısımlarında tercih edilirler [17, 18].

Gaz türbinli motor parçalarında kullanılan bir diğer malzeme grubu kompozit malzemelerdir. İki ya da daha fazla malzemenin makro seviyedeki bileşimi olarak tanımlanan kompozit malzemeler ağırlıklarının düşük olması, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek mukavemet gibi üstün mekanik özelliklerinden dolayı uçak gövdesinde olduğu kadar jet motor parçalarında farklı amaçlar için kullanılmaktadır [16]. Daha hafif ve daha yüksek sıcaklıklara dayanıklı seramik ve kompozit malzemelerin jet motor komponentlerinde kullanımı, motorun metal komponentlerin dayanabileceğinden daha fazla çalışma sıcaklıklarında çalışmasını sağlayarak motor performansını, verimini arttırmasına ve yakıt tüketiminin azalmasına imkan sağlar. Jet motorlarının performanslarının zamanla artan performanslarına karşılık, yüksek sıcaklık malzemelerine yönelik ilgi giderek yükselmektedir [18].

Gaz türbinli malzemelerde tercih edilen kompozit malzemeler genel olarak, metal matris kompozitler, seramik matris kompozitler, reçine matris kompozitler, bal peteği

yapısındaki kompozitler olarak sıralanabilir. Düşük ağırlığın öncelikle göz önüne alındığı motorun soğuk kısımlarındaki muhafazalarının ve dış çerçeve halkaları için epoksi reçine gibi elyaf takviyeli kompozit malzemeleri geliştirilmiştir. Yüksek sıcaklıkta çalışan jet motor parçalarında yaygın olarak kullanılan süperalaşımın yanında alternatif olarak metal matrisli, seramik matrisli yüksek sıcaklık kompozit malzemeleri de yer almaktadır [32].

Pale, kanatçık gibi yüksek sıcaklıkta çalışan komponentlerin ana malzemelerinin korunması seramik malzemeler ile sağlanır. Yeterli ve istenen performanslarının sağlanması, tasarlanan ömürlerine ulaşılması için termal bariyer olarak bilinen kaplama malzemesi olarak da yine seramik kullanılmaktadır. Diğer yandan seramik malzemeler pale, kanatçık, destek halkaları gibi parçaların yapısında da yer almaktadır [15].

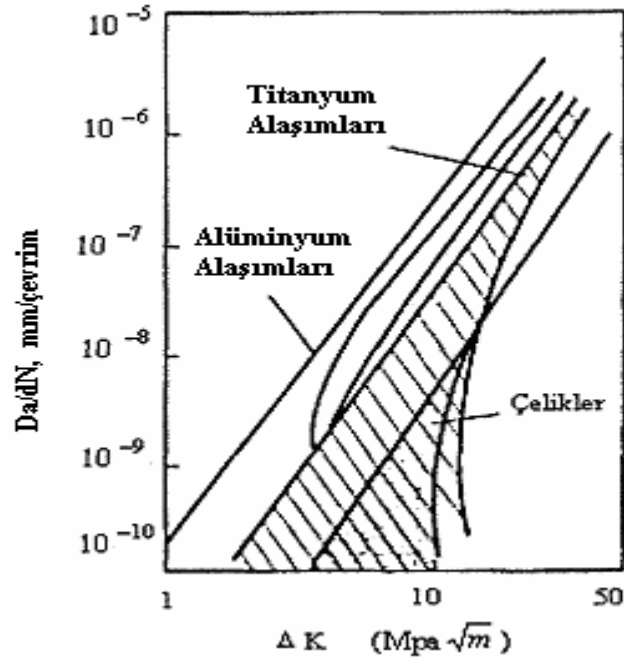
Gaz türbinli motorlarda kompozit malzemeler; motorun çalışması esnasında oluşan gürültünün kontrol edilmesinde, izolasyon ve kaplama malzemesi olarak hava alığı, egzoz ve kuyruk kısmı gibi motorun bir çok kısmında petek yapılı kompozit malzemeler tercih edilmektedir [17].

Gaz türbinli motorların performans özelliklerinin gelişmesine paralel olarak, jet motor parçaları daha yüksek sıcaklıklarda, daha fazla çalışma yükleri altında çalışmaya başlamışlardır. Bu çalışma koşulları altında çalışan parçalarda yüksek mukavemetli, kırılma tokluğu düşük, çatlak başlamasına karşı direnci yüksek olan fakat çatlak ilerlemesine karşı direnci düşük olan malzemeler kullanılmıştır. Böylece yüksek sıcaklığın yapabileceği olumsuz etkiye karşı da önlem alınmıştır.

Kırılma tokluğu düşük ve yüksek mukavemetli olan bu malzemelerin kullanıldığı jet motorlarında, malzemelerin ihtiva ettiği kusurlar, imalat sürecinde yapılan hatalar sonucundaki süreksizlikler yorulma olayı nedeniyle hızla ilerlemiştir. Bu malzemelerin çatlak ilerleme dirençlerinin düşük olması sebebiyle de yorulma kaynaklı bir çok motor hasarı meydana gelmiştir. Meydana gelen hasarların sonunda hasar toleransı yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu doğrultuda yorulma kritik parçalar için kırılma programları geliştirilmiş ve uygulanmıştır [19]. Bu programlar yapısında, imalatında daha az hata

bulunduran malzemelerin kullanılmasını, kritik çatlak olarak adlandırılan bir çatlak boyutuna kadar motor parça malzemelerinin belirli aralıklarla kontrol edilmesi ihtiyacını doğurmuştur.

Gaz türbinli motor parçalarında kullanılan bazı malzemelerin değişik faktörlere bağlı olarak yorulma davranışları aşağıdaki şekillerde verilmektedir. Şekil 3.1.'de titanyum alaşımlarının, alüminyum alaşımlarının ve çeliklerin çatlak ilerleme hızları irdelenmiştir.



Şekil 3.1. Çok kullanılan malzemelerde çatlak ilerleme değişimleri

Şekil 3.1.'de görüldüğü üzere çelik ve titanyum alaşımlı malzemelerde, yorulma çatlakları alüminyum alaşımlı malzemelere göre daha büyük gerilmelere maruz kalınması sonucunda oluşmaya başlamış, fakat yorulma çatlakları tüm malzemelerde benzer hızlarda ilerlemiştir.

3.2. Çatlakların İlerlemesi ve Oluşan Hatalar

Gaz türbinli motor parçaları çalışmaları süresince maruz kaldıkları dinamik gerilmeler sebebiyle, yüzeyden çatlakların başlaması, ilerlemesi ve yapının kırılması ile sonuçlanan yorulma hasarları ile karşılaşılır. Yorulma hasarları maruz kalınan mekanik yükler altında olabileceği gibi, maruz kalınan sıcaklık değişimleri sonucunda ısıl yorulma, sıcaklık değişimlerinin mekanik gerilmelerle beraber etkimesi sonucunda ısıl-mekanik yorulma, korozif aktif çevre koşulları ile temas halinde iken korozyon yorulması şeklinde de meydana gelebilir. Jet motor parçaları serviste çalışmaları sırasında bu yorulma hasarlarının dışında sürünme, korozyon gibi diğer hasar mekanizmaları sebebiyle de hasara uğrayabilir. Bu hasar sebepleri, biri ya da bir kaçının bir kombinasyonu şeklinde de meydana gelebilir.

Gaz türbinli motor parçalarında bu doğal hasar sebeplerine ek olarak diğer hasar sebepleri, malzemenin yapısal direncini azaltarak komponentin erken hasara uğramasına ya da kullanımdan kaldırılmasına yol açabilir. Bu sebepler yabancı madde çarpma hasarı, hatalı motor kullanımı (aşırı egzoz gaz sıcaklığı, aşırı motor devri vb.), aşınma, malzeme kusurları, imalat hataları şeklinde sıralanır. Bu hasarların, daha iyi yapılan komponent tasarımı ile, motor izlenmesi ve detaylı uygulanan bakım, kontrol faaliyetleri ile hasarların daha erken meydana gelmesi önlenebilir [20]. Bu hasarlar; ilk aşama yorulma, ilerleyen safhalarda oluşabilen yorulma yorulma, sıcaklık değişimlerine bağlı yorulma ve çevrimsel gerilmelere ve korozif çevre koşullarına bağlı yorulma olmak üzere dört çeşittir.

3.2.1. İlk Aşama Yorulma Olayları

İlk aşama yorulmaya kısa ömürlü yorulma da denebilir. İlk aşam yorulma; yorulma hasarının meydana gelebilmesi için gerekli olan gerilme ya da şekil değişim çevrim sayısının kısa olduğunu belirtir. Kısa ömürlü yorulma hasarının 10^5 gerilme çevrim sayısından daha az bir çevrim sayısında meydana geldiği kabul edilir. Uçak jet motor

parçalarında kısa ömürlü yorulma hasarı, parçaların çalışmaları esnasında maruz kaldıkları merkezkaç yüklerinden, burulma yüklerinden, gaz basınç yüklerinden ve sıcaklık değişimlerinin oluşturduğu yüklerden kaynaklanır. Özellikle şaftlar ve diskler gibi dönen parçaların büyük bir kısmı, serviste ilk aşama yorulma hasarına maruz kalırlar ve bazı durumlarda kırılırlar [12, 16, 17, 18].

Diskler, şaftlar ve yanma odası muhafazası, basınç boruları gibi komponentler büyük değerlerdeki yük çevrimlerine maruz kalan kritik motor malzemeleridir. Bu gibi komponentlerin kullanım ömürleri, servis esnasında karşılaşılabilecekleri kısa ömürlü yorulma hasarı nedeniyle sınırlandırılmıştır. Bu kritik komponentlerin üzerinde meydana gelen yorulma mekanik yüklemelerinin sebepleri disk üzerine etkiyen merkezkaç kuvvetler ve ısı yükleri, şaft üzerine etkiyen eğilme, burulma yükleri, muhafazalar içersinde oluşan yüksek basınç yükleri, komponentler içersindeki ısıl gradyanların oluşturduğu yükler şeklinde sıralanabilir. Bu yüklerin, kuvvetlerin çevrimsel olmaları, motorlardaki güç ayarlamalarındaki değişimlerden kaynaklanır. Motorun çalışması esnasında tam bir çevrim, motorun durgun durumundan maksimum dönme hızına kadar ivmelendirilmesi ve daha sonra tekrar durgun duruma dönmesi ile gerçekleşir. Değişik büyüklüklerdeki farklı birçok daha küçük çevrim, gaz kolunun diğer bütün hareketleri vasıtasıyla gerçekleşir. Gaz türbinli jet motorları için kısa ömürlü yorulma olayı, motor dönme hızlarındaki, parça üzerlerindeki sıcaklık dağılımının ya da motor iç basınç değişimleri gibi çoğu gaz kolu hareketine bağlı olan değişimlerle ifade edilir [12, 17].

İlk aşama yorulma gerilimleri aynı zamanda uçağın manevralarından kaynaklanan atalet ve basınç yüklerinin oluşturduğu tekrarlı yükler sonucunda oluşabilir. Çoğu dönen parça için baskın yük, dönme hızına bağlı olan santrifüj yüklerdir. Santrifüj yükleri dakikada ki devir sayısının (RPM) karesiyle doğru orantılı olduğundan uçağın kalkışı esnasındaki devir değişiminden kaynaklanan gerilme değişimleri, motorun rölanti durumundaki aynı devir değişiminden oluşan gerilme değişimlerinden daha büyüktür. Sonuçta yüksek devir bantlarındaki gaz kolu hareketleri, daha düşük devir bantlarındaki gaz kolu hareketleriyle karşılaştırıldığında, hasar oranı daha yüksektir.

3.2.2. İlerleyen Safhalarda Oluşabilen Yorulma Olayları

İlerleyen safhalar oluşabilen yorulmalar ilk aşama yorulmalara göre ömürleri daha uzundur. İlk aşama yorulma olayına sebep olan gerilmelere göre daha düşük seviyelerdeki gerilme koşulları altında oluşur. Uzun ömürlü yorulma olayından kaynaklanan hasarlar, genellikle 10^5 çevrim sayılarından daha büyük gerilme çevrim sayılarında oluşur. Uzun ömürlü yorulma hasarının, motor tasarımının başlangıç aşamasında, tahmin edilmesi zordur ve motor geliştirme testlerinde ya da serviste motorun ömrünün ilk zamanlarında meydana gelmeyebilir [14, 20].

Düşük genlikli, yüksek frekanslı yük çevrimlerinde, ilk aşamada oluşan yorulma nedeniyle oluşmuş bir çatlak, çok çabuk bir şekilde ilerleyerek hasara yol açabilir. Bu hasar modunun anlaşılmasında komponentin maruz kaldığı hem düzenli hem de değişken gerilmeler, sıcaklık ve malzeme özellikleri hakkında bilgi sahibi olunmalıdır [21].

İlerleyen safha yorulması öncelikle motor tasarımının bir fonksiyonudur. Bir motorun kendi yapısı, bir çok uzun ömürlü yorulma olayının oluşmasına neden olacak faktörleri barındırır. Bir motorda gaz akışı esnasında, gaz akışı ve zıt yönünde bazı engellerin varlığı akış içerisinde bozulmaların oluşmasına neden olur. Bu olay da bozuk gaz akışının geçtiği komponentleri etkiler. Geçiş frekansı, kademelerdeki engel sayısına ve kademelerin dönme sayısına bağlıdır. Yüksek değerlerdeki aerodinamik yük çevrimlerine maruz kalan bir kompresör kanatçığında meydana gelen yorulma hasarı, bu tip bir yorulma hasarıdır. Türbin assemblesindeki, 19.400 dev/dak hızla dönen lüle arkasındaki her bir pale bir saat içerisinde uzun ömürlü yorulma olayına yol açacak 39,6 milyon titreşim yükü çevrimi üretir [21, 22].

İlerleyen safha yorulma olayının nedenlerinden biri motorda hava alığı kısmında hava akışının bozulmasıdır. Bu kısımda meydana gelebilecek bir hava akışındaki bozulma tasarıma ya da uçağın çalışma koşullarına bağlı olabilir.

Gaz türbinli motorlarda, dönen parçaların dengesinin mükemmel olarak sağlanması çok zordur. Yüksek hızlarda dönen, ağır parçalara sahip mekanik sistemlerde titreşimler, sarsıntılar oluşur. Örneğin kompresör rotorundaki bir ayarsızlık veya dengesizlik şaft hızına bağlı olarak uzun ömürlü yorulma hasarına sebebiyet verebilecek titreşimleri, sarsıntıları oluşacaktır. Bu sarsıntılar komponentlerin normal çalışma koşullarına göre daha büyük bir titreşim aralığında çalışmasına yol açar. Bunun için bu komponentler rotor dengesizliğinden kaynaklanan titreşimlerden etkilenmeyecek şekilde dizayn edilmelidir [12, 14].

3.2.3. Sıcaklık Değişimlerine Bağlı Yorulma Olayları

Yapısal parçaların büyük çoğunluğu çalışmaları esnasında sıcaklık değişimlerine maruz kalır. Yorulma olayına sebebiyet veren gerilmeler maruz kalınan mekanik gerilmelerden değil de sıcaklık değişimlerinden kaynaklanıyorsa meydana gelen yorulma olayı ısıl yorulma olarak adlandırılır. Isıl yorulma gerilmeleri, sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan ısıl gerilmeler ve diferansiyel genleşmeler sonucunda oluşur. Çünkü bu koşullarda gaz sıcaklığındaki değişim oranı hızlıdır ve özellikle motorun sıcak kısımlarında yüksek ısıl gerilmeler meydana gelir.

Malzemeler her zaman yüksek sıcaklıklara farklı şekillerde maruz kalırlar. Türbin kanatçıkları ya da çıkış yönlendirme lüleleri gibi parçalar gaz akışına bütünüyle temas ederek doğrudan maruz kalır. Yüksek basınç kompresörü, türbin diskleri gibi parçalar ise gaz akışına kısmen temas ederek yüksek sıcaklıklara dolaylı olarak maruz kalır. Her bir durumda ısıl gerilmeleri meydana gelecektir. Bunun nedeni çoğu motor parçasının geometrik biçiminin, farklı ısınma ve soğuma oranlarına sahip olarak parça içerisinde farklı diferansiyel genleşmelerin oluşmasıdır. Isıl yorulma büyük gerilme seviyelerinin indüklenmesi bakımından kısa ömürlü yorulmaya benzerdir. Bu gerilmeler parça içerisinde mekanik olarak oluşan gerilmelerle birleşebilir. En büyük ısıl gerilmeler genellikle motorun çalıştırılması ya da hızlı güç değişimleri esnasındaki koşullar gibi, geçiş sıcaklıkları koşulları sırasında meydana gelir [12, 17].

3.2.4. Çevrimsel Gerilmelere ve Koroziif Çevre Koşullarına Bağlı Yorulma

Malzemelerin çevrimsel gerilmelere ve koroziif çevre koşullarına maruz kalmaları sonucunda oluşan hasarlara korozyon yorulması veya çevresel yorulma da denir. Jet motor parçaların bir çoğu hava, su, tuzlu su, ve sıcak gazlar gibi koroziif çevre koşulları ile etkileşim içersindedir. Koroziif çevre koşullarının etkisiyle uçak jet motor komponentlerinde hasarlar meydana gelebilir. Koroziif özelliğe sahip etmenler, motor yakıtı içersine sülfür şeklinde, motor içersine alınan hava ile sodyum klorid ya da kirli hava şeklinde sızabilir.

Malzemenin yüzey kısımlarında çevresel ve koroziif etkiler neticesinde bozulmalar oluşur. Yüzey kalitesinin bozulması ile malzeme yüzeyinin zayıflaması yüzeyde mikro çatlakların oluşmasına olanak sağlar. Koroziif çevre koşullarının etkisi ile yorulma çatlakların başlangıç ve ilerleme aşamaları daha hızlı olur. Korozyon yorulması olayının etkisi sadece korozyon olayının ya da sadece yorulma olayının etkisinden daha yüksektir [8, 12, 17, 18].

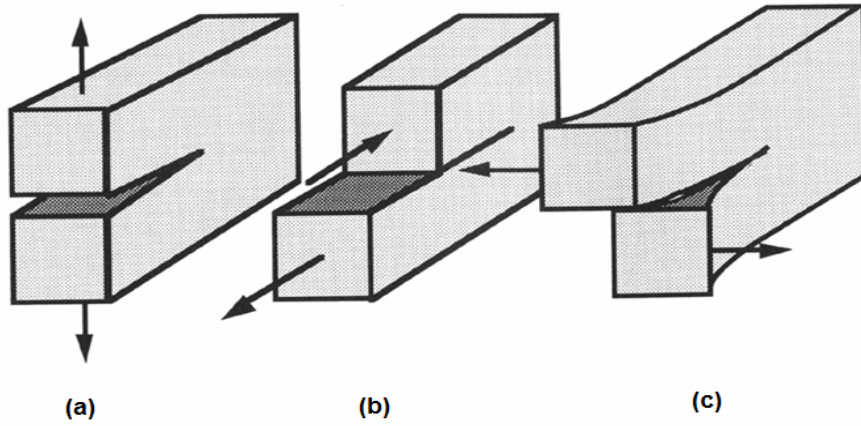
Çevresel şartlar neticesinde oluşan korozyon yorulmasına bağlı çatlaklar, kırık bölgenin bitişiğinde bulunan bir çok sayıda ufak çatlağın, pürüzün, ya da oyukların varlığı ile bulunabilirler [21].

3.3. Oluşan Hataların Sebep ve Sonuçları

Gaz türbinli motor malzemeleri kullanımda buldukları esnasında oluşan yorulma çatlaklarının, gerekli emniyetin sağlanması açısından kırılma olayına yol açabilecek belirli bir kritik boyuta ilerlemesinden önce belirlenmesi ve izlenmesi gerekir. Bu, programlı ve programsız bakım faaliyetlerinin bünyesinde uygulanan Tahribatsız Kontrol Yöntemleri, TKY, ile yapılır. Tanım olarak tahribatsız kontrol yöntemleri herhangi bir malzemenin bileşimi, geometrisi, imalat ve yapı hataları hakkında bilgi edinmek amacıyla maddenin fiziksel ve fonksiyonel özelliklerine zarar verecek herhangi bir hasara uğratmadan yapılan deney ve testlerdir [15, 27].

Malzeme yapısı içerisindeki yorulma çatlakları ya da yorulma çatlaklarının oluşmasına, ilerlemesine yol açabilecek darbe hasarı, korozyon hasarı gibi süreksizlikler tahribatsız kontrol yöntemleriyle kısa bir süre içerisinde tespit edilebilir. Zaman ve kullanım içerisindeki değişimleri, boyutları malzeme yapısına zarar vermeden izlenebilir. Uçak jet motor parçaları serviste yorulma yükleri, korozyon ve yüksek sıcaklık gibi farklı çalışma ortamlarının etkisi ile artan bir hata yüzdesiyle karşılaşırlar [23, 25, 26].

Gaz türbinli motor malzemeleri tüm kullanım ömürleri boyunca yapılarında hasar oluşma olasılığı, kabul edilebilecek kadar, düşük seviyede olmalıdır. Bu emniyetin temin edilmesi için oluşan yorulma çatlaklarının hangi hızla ilerlediğinin ve yapının kalan mukavemetinin hangi hızla düştüğü belirlenmelidir. Bu inceleme metodlarının geliştirilmesi jet motor parçalarının tasarımı sırasında “kırılma mekaniği” olarak adlandırılan bilim dalı ile yapılır. Kırılma mekaniği bilimi ile yapının kalan mukavemetinin çatlak boyutu ile değişimi, beklenen servis yüklerinde hangi çatlak boyutunun tolere edilebileceği belirlenir. Ayrıca kritik çatlak boyutunun belirlenmesi, yapının servise başlayabileceği müsaade edilebilir süreksizlik boyutunun belirlenmesi, çatlakların servis esnasında hangi aralıklarla kontrol edilmesi gerektiği belirlenir.



Şekil 3.2. Çatlak ilerleme düzenleri

a) Açılma düzeni b) İleri kesme düzeni c) Paralel kesme düzeni

Yorulma çatlağının nasıl ilerlediği ve yapının mukavemetini nasıl etkilediği sorularının yanıtlanması için gerekli kavram ve eşitlikleri, kırılma mekaniği sağlar. Şekil 3.2.'de kırılma mekaniği biliminde bu eşitliklerin belirlenmesinde temel alınan düzenler; açılma düzeni, ileri kesme düzeni ve paralel kesme düzeni olarak belirtilmektedir.

Motorun sökülmesinden önce, motor parçalarının yapısındaki bir çatlağı tespit etmek için tahribatsız kontrol yöntem değerlendirmelerine kırılma mekaniği ile ulaşılır. Kırılma mekaniğinin uçak motor parça tasarımındaki uygulamaları ile parçaların ömürleri belirlenebilir. Bu uygulamalarda parçanın uygun tahribatsız kontrol teknikleri ile tespit edilebilen çatlak boyutlarından daha küçük çatlakları ihtiva ettiği kabul edilir. Daha sonra kritik çatlak değerine kadar olan parça ömrü belirlenir. Bu hesaplama ve uygulanan test sonuçlarına dayanarak parçanın hangi aralıklarla kontrol edilmesi gerektiği ya da kullanımdan kaldırılması gerektiği belirlenebilir [8, 9, 10, 12].

4. KULLANIM ESNASINDA OLUŞAN HASARLARIN TESPİTİ

Gaz türbinli motor malzemeleri, çalışmaları esnasında değişken şiddetdeki yükler sebebiyle önce yorulmaya sonra da kırılmaya maruz kalmaktadırlar. Yorulma hasarı genellikle yüzeyden başlayan çatlaklar şeklinde oluşur. Yüzeyden başlayan çatlaklar, maruz kalınan gerilmelerin etkisiyle kalan parça kesitinin, gerilmelere dayanamayacağı kritik bir boyuta kadar ilerlemesinden sonra kırılma olayını meydana getirir.

Gaz türbinli motor malzemelerinden bazıları çok önemlidir. Bu parçaların uçak havadayken arızalanması bazen uçağın düşmesine bile neden olabilir. Hasara uğradığında uçuş emniyetini etkileyebilecek, kritik olarak adlandırılan komponentlerde serviste oluşan yorulma çatlaklarının belirli bir kritik boyuta ilerlemelerinden önce tespit edilmeleri ve bu komponente uygun işlemlerin uygulanması gerekir. Jet motor komponentlerinde serviste çalışmaları esnasında oluşan yorulma çatlaklarının belirlenmesi ve izlenmesi programlı ve programsız bakım faaliyetlerinin bünyesinde uygulanan Tahribatsız Kontrol Yöntemleri ile yapılır. Programlı bakım faaliyetleri tavsiye edilen programlı bakımlar arası geçen uçuş sayısı ya da uçuş sayısının doldurulması gibi bakım el kitaplarında belirlenmiş aralıklarda uygulanır. Programsız bakım faaliyetleri ise, motor çalışma performansındaki normal dışı kayıplar, aşırı egzoz gaz sıcaklığı, motora yabancı madde girmesi, motorun sıcak çalıştırılması ya da motor yağında metal parçacıkların aşırı miktarda bulunması gibi sebeplerle uygulanabilir. Kontrol edilecek parça uçak üzerinden sökülerek ya da sökülmeden kontrol edilebilir. Uçak üzerinde parçalar sökülmeden yapılan kontrol işlemleri ile kontrol edilecek parçanın sökme takma işlemleri için harcanan emek ve zamandan tasarruf sağlanabilir. Ayrıca kısa sürede yapılan kontrol işlemleri ile uçakların hızlı bir şekilde gelişmesi ve taşımacılıktaki öneminin artmasıyla yükselen yerde kalma maliyetlerinden de tasarruf sağlanabilir.

Her makine gibi uçağın da bir kullanma kitabı ve bakım kitabı vardır. Bakım kitaplarında uçağa uygulanacak testler ve kontroller önemli yer tutar. Uçak imalatçıları uçak gövde ve motorunun, her bölümü için uygulanması gereken test metodu ve

uygulanma aralıkları konusunda tavsiyelerde bulunur. Bunlar TKY prosedürleri ile ilgili olup imalatçı firmaların bakım el kitaplarında, servis bültenlerinde belirtilmiştir. Bu prosedürler, aynı zamanda deneyimler sonucunda problemlerle karşılaşılan kısımlarda, kontrol gereksinimi belirlenmesi sonucu uçak kullanıcıları tarafından daha da detaylandırılabilir.

Gaz türbinli motor malzemelerinin kontrollerinde kullanımda iken yorulma çatlaklarının belirlenmesinde uygulanan başlıca tahribatsız kontrol yöntemleri; gözle kontrol, optik aletlerle kontrol, penetran sıvı ile kontrol, manyetik parçacıklarla kontrol girdap akımları ile kontrol ve ultrasonik kontrol yöntemleridir. Bu yöntemler her seviyedeki jet motor bakım faaliyetlerinde uygulanabilir. Yorulma hasarlarının tespit edilmesinde bu yöntemlerin dışında bazı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler x ışını radyografisi, gama ışını radyografisi, nötron radyografisi, akustik emisyon, x ışını tomografisi, yüzey kopya yöntemi ve termografi olarak sıralanabilir.

Bahsedilen test yöntemleri prensipleri, gerektirdiği teçhizatlar ve tespit ettiği süreksizlikler bakımından farklılıklar gösterirler. Yapıdaki yorulma çatlakları gibi olası süreksizlikleri tespit etmek için uygulanacak olan tahribatsız kontrol yönteminin seçimi, kontrol edilecek parçanın malzeme özelliklerine ve kontrol işleminin hassasiyet desecesi gibi faktörlere ihtiyaç duyar.

Kullanılacak yöntem hangi yöntem olursa olsun ve hangi seviyede bakım yapılırsa yapılsın test edilecek yapının öncelikli olarak, genel bir göz kontrolü yapılmalıdır. Bu, büyük harici hasarların tespitini sağlar. Böylece teçhizat kullanılarak harcanan zaman ve iş gücünden tasarruf edilmiş olur. Gözle kontrolle tespit edilemeyen ya da ulaşılamayan yerlerin kontrolü optik aletler kullanılarak yapılır. Ayrıca kontrol edilecek parçanın malzeme özelliklerine göre penetran sıvı, girdap akımları, manyetik parçacıklarla kontrol, ultrasonik kontrol gibi uygun yöntemler seçilerek yorulma süreksizlikleri belirlenebilir. Bu yöntemler programlı ve programsız bakım faaliyetleri bünyesinde uçak üzerinde motor parçaları sökülmeden uygulanabilme avantajlarına sahiptir. Sökülen parçaların, fabrika seviyesi bakımında gerektiğinde daha detaylı

kontrol edilme imkanı vardır. Yöntemlerin uygulanmasında test parçasının bileşimi ve geometrisi ve boyutu göz önünde tutulmalıdır [6, 9, 18, 24, 27].

4.1. Hasarının Tespitinde Uygulanan Usuller

4.1.1. Optik Aletlerle Kontrol Yöntemi

Çıplak gözle ulaşılamayan ve tespit edilemeyecek kadar küçük olan süreksizliklerin belirlenmesinde optik aletlerle kontrol yöntemi kullanılır. İnsan gözünün göremeyeceği kadar küçük boyuttaki süreksizlikler baroskop, endoskop ve mikroskop gibi optik aletlerin kullanımıyla testler gerçekleştirilir.

Baroskop, testler esnasında en yaygın kullanılan optik alettir. Baroskop, küçük çaplı giriş delikleri yardımıyla jet motorlarının ulaşılamayan iç kısımlarının görsel olarak kontrol edilmesi için tasarlanmış, hassas optik bir cihazdır. Baroskop kontrolü, jet motor bakım programında motor durumunun izlenmesindeki en önemli unsurdur. Hat bakım kontrollerinde sökülen bir motorun dönen parçalarının % 90'ından fazlası baroskop kontrolü sayesinde yapılır [13, 26, 28]. Bir jet motorunda fan, kompresör paleleri ve kanatçıkları, yanma odasının iç kısımları, türbin paleleri ve kanatçıkları, baroskopa en çok kontrol edilen malzemelerdir.

4.1.2. Gözle Kontrol Yöntemi

En temel ve basit yöntemdir. Tahribatsız kontrol yöntemlerinde yüzeye açık süreksizliklerin tespitinde kullanılır. Bu yöntemle belirli bir parçanın yüzeye açık kısımları, gözle görülebilecek çatlak ve korozyon gibi genel yapısal hataların varlığının belirlenmesi açısından gözle kontrol edilir. Gözle kontrolde kontrol edilecek yüzeye ulaşabilme, yüzeyin temizliği, hatanın yeterli boyutsal büyüklüğe sahip olma zorunluluğu bu yöntemi sınırlayan faktörlerdir. Gözle kontrolde iyi bir ışık kaynağı,

büyüteçler ve aynalar yardımcı aletler olarak kullanılabilir Görüş imkanı zor olan bölgelerde uygun ışık kaynakları kullanılabilir. Bu yöntemle geniş alanların çok kısa bir süre içerisinde kontrol edilmesi mümkündür ancak riskler içermektedir [26, 28].

4.1.3. Manyetik Parçacık Metodu İle Kontrol Yöntemi

Ferromanyetik özelliğe sahip malzemelerden yapılmış parçaların yüzeye açık ve yüzeyin hemen altındaki süreksizliklerin tespit edilmesinde manyetik parçacık metodu kullanılır. İşlem basit temellere dayanır. Kontrol edilecek parça üzerinde, elektrik akımı kullanılarak yönlü manyetik alan oluşturulur. Yapıdaki süreksizlikler, oluşan manyetik alanı bozarak bu bölgelerde kutuplaşmalar oluşturur. Daha sonra parça yüzeyine uygulanan manyetik parçacıklar, kutuplaşmaların olduğu bölgelerde toplanır. Bu manyetik parçacıklar, metal tozları, fulerian özellikteki renkli tozlar veya sıvı solüsyonlar olabilir. Parça uygun ışık altında incelendiğinde süreksizliklerin parça üzerindeki yeri ve boyutu tespit edilebilir [12, 16, 27, 28].

4.1.4. Penetran Sıvı İle Kontrol Yöntemi

Sadece yüzeye açık süreksizliklerin belirlenmesinde penetran sıvı yöntemi kullanılır. Kontrol işlemi çeşitli aşamalardan oluşur. Yöntemin etkinliğini, muayene edilen parçanın yüzey niteliği ve yüzey temizliği, hatanın çeşidi ve muayene sıcaklığı gibi faktörlerden etkilenmesi azaltmaktadır.

4.1.5. Ultrasonik Kontrol Yöntemi

Malzemelerin iç yapısındaki süreksizliklerin belirlenmesinde ultrasonik kontrol yöntemi tahribatsız kontrol yöntemi olarak kullanılır. Fakat özel, geliştirilmiş problemlerin kullanımıyla yorulma çatlakları gibi yüzeye açık süreksizliklerin tespiti mümkündür.

Ultrasonik kontrolün temel prensibi, bir prob tarafından üretilen yüksek frekanslı ses dalgalarının kontrol edilecek test malzemesi üzerinde yayılması ve bir süreksizliğe çarptıktan sonra tekrar proba yansması esasına dayanır.

4.1.6. Girdap Akımları İle Kontrol Yöntemi

Diğer tahribatsız kontrol yöntemi de girdap akımlarıdır. Yüzeydeki ve yüzeyin hemen altındaki süreksizliklerin tespit edilmesinde kullanılır. Süreksizliklerin belirlenmesi, iletken malzemelerin üzerlerinde oluşturulan girdap akımlarının kullanılması ile gerçekleştirilir. Üzerinden alternatif akım geçirilen bir bobin, iletken bir malzemeye yaklaştırıldığında, malzeme yüzeyinde iç kısımlara doğru yayılan girdap akımları oluşur. Üzerinden alternatif akım geçirilen bir bobin, iletken bir malzemeye yaklaştırıldığında, malzeme üzerinde herhangi bir hata, geometrik ya da metalürjik değişimin olmaması halinde düzgün bir dağılıma sahip girdap akımları oluşacaktır. Malzeme üzerinde bir çatlak gibi hatanın olması halinde ise girdap akımlarının dağılımında bozulmalar oluşacaktır.

4.1.7. Akustik Emisyon Kontrol Yöntemi

çevresel etkilere maruz kalan malzemeler gerilmeler ya da ses darbeleri üretirler. Bu ses darbelerine akustik emisyon denir. Akustik emisyon kaynakları çatlak ilerlemesi ya da plastik deformasyon gibi süreksizliklerle ilgili deformasyon süreçleri ile ilgilidir. Akustik yayınım genellikle ultrasoniktir. Süreksizliklerin oluşumu sırasında yaydıkları ultrasonik enerji, piezoelektrik sensörler tarafından algılanır ve enerjinin genlik ölçümü ile oluşan süreksizliğin boyutu hakkında bilgi edinilebilir. Akustik emisyon, yapıya uygulanan gerilme etkisiyle, deformasyon anında oluşan, elastik şekil değişim enerjisinin ses darbeleri veya çatlak oluşumu gibi plastik deformasyon esnasında oluşan darbelerdir.

4.1.8. Radyografik Kontrol Yöntemleri

Elektromanyetik ışınların kullanılarak üç boyutlu malzeme yapısı içersindeki süreksizliklerin, kalınlık ve yoğunluk değişimlerinin bir film tabakasına ya da bir ekrana ya da monitöre aktarılması prensibine dayanan malzemenin iç yapı süreksizliklerinin tespit edilmesinde kullanılan bir tahribatsız kontrol yöntemine Radyografi yöntemi denir. Malzemenin içine nüfuz edebilen çok kısa dalga boylu x ya da gamma ışınları kullanılır.

Boşlukta ışık hızı ile doğrusal olarak yayılan bu ışınımın sayesinde kontroller gerçekleştirilir. Fakat malzemenin kalınlığına ve yoğunluğuna bağlı olarak şiddetleri gitgide zayıflar. Bu özellikleri ile malzemelerin kalınlık, yoğunluk değişimlerinin görüntüsünün alınmasında kullanılırlar. Bu ışınlar gözle görülemezler fakat duyarlı film tabakaları üzerinde kimyasal değişimlere sebep olurlar. Bu film tabakaları üzerinde yapılan banyo işlemleri ile film üzerindeki değişimler gözle görünür hale getirilebilir. X ve gamma ışınlarının üretimleri ve özellikleri birbirlerinden farklı olmakla beraber iki teknik de benzer şekilde uygulanmaktadır. X ışınları elektrik enerjisi ile üretilirken, gamma ışınları doğal radyoaktif izotoplar tarafından yayınan bir enerji türüdür. Doğal radyoaktif izotoplar atom seviyelerindeki kararsızlıklar nedeniyle gamma ışınları yayarlar. Kararlı elementlerde kararsız hale getirilerek ışınım sağlanabilmekte, ancak her iki durumda da radyoaktivite başladıktan sonra engellenmemektedir.

4.1.9. Yüzey Kopyası İle Kontrol Yöntemi

Farklı çevre koşullarına maruz kalan malzemelerdeki mikro yapısal hasarların, komponentlerin kalan emniyetli ömürlerinin belirlenmesine yüzey kopyası ile kontrol yöntemi yardımcı olur. Jet motor bakımında hasara uğramış komponentlerin, hassas olarak hasar analizinde tercih edilebilen bir yöntemdir. Bu yöntem, yüksek sıcaklıkta çalışan uçak motor parçalarının yorulma ve sürünme analizlerinde, parçaların kalan emniyetli ömürlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntemde öncelikle

incelenecek yüzeydeki oksit veya korozyon tabakası giderilir. Daha sonra plastik, karbon ya da oksit malzemelerinden oluşan asetat kopya malzemesi kullanılarak direk metotla ya da ilk kopyadan elde edilen ikinci bir kopyanın kullanıldığı dolaylı metot kullanılarak bir kopyası hazırlanır. Kopya malzemesi olarak asetatın dışında reçine ya da kauçuk malzeme de kullanılabilir. Kopya malzemesi seçimi, incelenecek mikro yapısal özelliklere ve komponent geometrisine göre belirlenir.

4.1.10. X Işını Tomografisi İle Kontrol Yöntemi

bir test parçasının ince bir kesit resminin elde edildiği görüntüleme tekniğine tomografi yöntemi de denilmektedir. Tomografi tekniği diğer görüntüleme tekniklerinden farklılık gösterir. Sistemdeki enerji ışını ve dedektör görüntülenen yüzey ile aynı düzlemedir. Tomografi ile kontrol yönteminde ultrasonik ses, elektronlar, protonlar, α parçacıkları, lazerler ve mikro dalgalar gibi farklı bir çok enerji ışını ile birlikte kullanılmıştır. Fakat endüstrideki tahribatsız kontrol yöntemlerinde sadece X ışını tomografisinin yaygın bir kullanım alanı mevcuttur.

Testler, parçanın çevresinde bir yörünge çizerek hareket eden ışın kaynağının farklı yönlerden çekim işlemi yapılması ile ya da X ışını kaynağının sabit durduğu test parçasının dönerek hareket ederken çekim işleminin yapılması ile gerçekleştirilir.

4.1.11. Termografi ile Kontrol Yöntemi

Termografi ile kontrol yöntemi, kontrol edilecek test parçasının ısıtılıp parça yüzeyinin sıcaklık haritasının ölçülmesidir. Yüzeydeki sıcaklık farklılıkları ya da yüzey sıcaklığının zamanla değişimi kullanılarak malzemenin ısıl özelliklerini etkileyen, yüzey ve iç yapı süreksizlikleri tespit edilebilir.

Hangi yüzey kontrol edilecekse ona özel ısıtma yöntemi kullanılmalıdır. Bu ısıtma yöntemleri; noktasal ısıtma, çizgisel ısıtma, titreşim kaynaklı ısıtma, mekanik kaynaklı

ısıtma, elektrik kaynaklı ısıtma ya da bölgesel olarak parçanın soğutulması gibi farklı yöntemlerdir. Isıtma işlemiyle elde edilen ısı enerji parça yüzeyinde ve iç yapısında geniş bir alana, düzgün olarak yayılır ve malzemenin içine doğru, sıcaklık basamağı oluşturur. Bu yayılım, ısı dalgaları olarak tanımlanabilir. Isı dalgaları malzemenin ısı iletim karakteristiklerini etkileyen herhangi bir heterojenlikle karşılaştığında saçılır veya yansır. Saçılmanın derinliğine bağlı olarak bir zaman gecikmesi oluşur ve bu gecikme, yüzeyde bölgesel soğumalara neden olur. Yüzey sıcaklık dağılımının ölçülmesi ile hata derinliği bulunabilir.

4.2. Kullanılacak Usulün Seçimi

Malzemelerin kontrolü ve denetlenmesi esnasında uygulanacak olan tahribatsız kontrol yöntemleri prensipleri, gerektirdiği teçhizatlar ve tespit ettiği süreksizlikler bakımından farklılıklar gösterirler. Malzeme yapısı içerisindeki yorulma hasarlarını tespit etmek için uygulanacak olan tahribatsız muayene yöntemi, kontrol edilecek parçanın malzeme özelliklerine, geometrisine ve kontrol işleminin hassasiyet derecesine göre belirlenir [6, 9, 12, 13, 17, 18, 19, 24, 28].

Bir uçağın her malzemesinin belirli zaman dilimleri içerisinde kontrol edilmeleri teknik otoriteler tarafından ortaya konmuştur. Özellikle üç grupta değerlendirebileceğimiz uçağın motor, gövde ve aviyonik sistemleri ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Bu değerlendirmeler kullanıcı teknik kitap dediğimiz ve uçağın bakımı konusunda yol gösteren dokümanlarda zaten mevcuttur. Ayrıca yapılması gereken kontrol işlemleri servis bültenlerinde ya da TKY el kitaplarında uygulama prosedürleri şeklinde belirtilmiştir. Deneyimler sonucunda servis esnasında problemlerle karşılaşılan kısımlarda kontrol gereksinimi belirlenmesi sonucu uçak kullanıcıları tarafından bu prosedürler geliştirilebilir. İlgili prosedürler, her bir teknisyenin testi uygulaması esnasında aynı sonuçları alması açısından yeterli derecede detayla donatılmalıdır [50].

Malzeme yer alan süreksizlikler şekil olarak düzlemsel veya hacimsel olabilir. Bunların dikkatli bir biçimde kontrol edilmesi gereklidir. Kontrol edilecek yapıdaki

süreksizlikler örneğin yapıda bulunan yorulma süreksizliklerinin tespiti için düzlemsel ve yüzeye açık hatalara duyarlı yöntem seçimi gerekecektir. Yani yorulma çatlaklarının tespiti için öncelikle gözle kontrol, optik aletlerle kontrol, penetran sıvı ile kontrol, manyetik parçacıklarla kontrol, girdap akımları ile kontrol, ultrasonik kontrol, yüzey kopya yöntemi termografik kontrol, yöntemlerinden birisi seçilebilir [58]. Bu yöntemlerden gözle kontrol, optik aletlerle kontrol, penetran sıvı ile kontrol, girdap akımları ile kontrol, manyetik parçacıklarla kontrol ve ultrasonik kontrol yöntemleri jet motor bakım faaliyetlerinde yorulma hasarlarının belirlenmesinde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemler her seviyedeki jet motor bakım faaliyetlerinde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Yorulma hasarlarının tespit edilmesinde bu yöntemlerin dışında bazı yardımcı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler akustik emisyon, x ışını radyografisi, gama ışını radyografisi, nötron radyografisi, x ışını tomografisi, yüzey kopya yöntemi, termografi kontrol yöntemi, optik holografi olarak sayılabilir.

Özellikle yeni başlamış ya da belirmekte olan yorulma çatlaklarının tespit edilmesi önem taşımaktadır. Bu tespitin erken yapılması da malzeme özelliklerine bağlı olarak uygun yöntemler kullanılmasına bağlıdır. Noktasal kontrol gerektiren bölgelerde, iletken özellik gösteren malzemelere girdap akımları ve mıknatıslık özelliği gösteren malzemelere manyetik parçacıklarla kontrol yöntemleri uygulanabilir. Alüminyum alaşımları yapıların kontrolünde girdap akımları yöntemi uygulanırken, manyetik geçirgenliğe sahip çeliklerde, manyetik parçacıklarla kontrol yöntemi seçilmektedir.

Penetran sıvı yöntemi özellikle nikel ve titanyum alaşımı yapıların çatlaklarının kontrolünde kullanılmaktadır. Yüksek frekanslı alternatif akımın kullanıldığı girdap akımları ve yüksek frekanslı yüzey dalgaları ile her malzemeye uygulanabilen ultrasonik kontrol yöntemi ise yorulma çatlaklarının tespit edilmesinde uygulanan başlıca testlerdendir.

Gaz türbinli motorlar bilindiği gibi çok yüksek sıcaklık altında çalışan makineler olup, bu değer özellikle sıcak bölgede 1300 - 1600 °C değerlerine çıkabilmektedir. Bu yüksek çalışma sıcaklıklarında, mukavemet, tokluk ve sertlik özelliklerini yitirmeksizin

hizmet verebilen seramik ve metal malzeme gruplarından elde edilen yüksek sıcaklık kompozitleri kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık kompozitlerine optik aletlerle kontrol, penetran sıvı ile kontrol, radyografik ve ultrasonik kontrolün dışında, akustik emisyon tekniği ve termografi yöntemi de uygulanabilir. Yüksek frekanslı ultrasonik test sistemi seramik yapılarda kırılmalara neden olabilen küçük süreksizliklerin tespitinde hassas ölçüm için kullanılabilir. Seramik yapıların içerebilecekleri küçük hataların analizi için yüksek hızda ve duyarlıkta bir yöntem olan mikro odaklı X ışını test yöntemi geliştirilmiştir. X ışını tomografisi ise yüksek sıcaklık kompozitlerinin testinde kullanılan bir diğer yöntemdir.

Gaz türbinli motorların ses izolasyonunda ve kaplama yapılarında kullanılan tabakalı kompozitlerin yorulma olayı, yabancı madde hasarı sonucunda yüzey levhalarında oluşan çatlaklar gözle, optik aletlerle, penetran sıvı, girdap akımları yöntemleri kullanılarak tespit edilebilir. Petek yapılarda yapının içersine girerek korozyon olayına, genişerek yapının deformasyonuna sebep olabilecek su, nem radyografik yöntemler kullanılarak bulunabilir [6, 8, 28].

Gaz türbinli motorlarda kullanılan kontrol yöntemleri birbirlerinin yerini almanın yerine birbirlerinin tamamlayıcısı olarak kullanılmaktadır. Birkaç yöntemin aynı anda yapıya uygulanması ile farklı özellik, boyut ve konumdaki hataların varolma olasılıkları giderilerek yapısal bütünlükten emin olunabilir. Bu nedenle uçak bakımında yapılara tek bir yöntem uygulanmayıp, genellikle alternatif yöntemlerle birlikte bir grup yöntem seçimi tercih edilebilmektedir.

5. JET MOTORU YORULMA HASARLARININ İNCELENMESİ

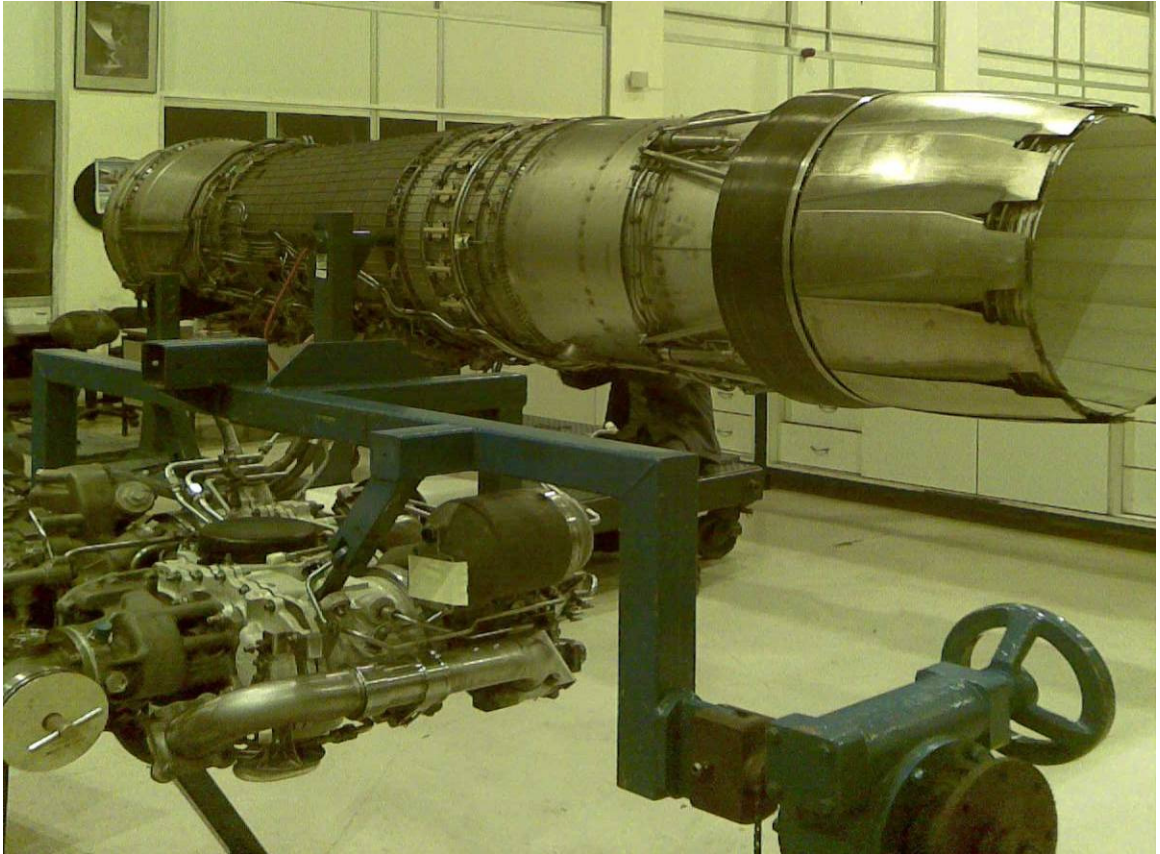
Uçak motorlarında dünyada başı çeken ABD'nin en büyük motor üreticilerinden olan General Electric firması tarafından üretilmiş sürekli gelişime tabi tutulan F110-GE-100 motorunun uçağa takılmadan önceki fotoğrafı şekil 5.1.'de verilmiştir. Bu motorun yaklaşık 30.000 libredir. Art yanma sistemine sahip bir gaz türbinli turbofan jet motorudur. Motorun, büyük bakımı dediğimiz D seviyesi yani fabrika seviyesi bakımı Türkiye'de yapılabilmektedir. Motorun uzunluğu 5 metre civarında, çapı 118 cm ve ağırlığı 2 tona yakındır.

Motor aerodinamik olarak birbirine bağlı, mekanik açıdan birbirinden bağımsız iki rotora sahiptir. Bunun yanında 1 adet yüksek basınç ve 2 adet alçak basınç türbini mevcuttur. Yanma odası daireseldir. [14-24].

Motorun iç yapısını biraz daha incelyecek olursak; alçak basınç sistemi iki kademe alçak basınç türbini tarafından döndürülen üç kademeli fan kısmından oluşur. Yüksek basınç sistemi ise dokuz kademeli kompresör, bir yanma odası ve tek kademeli hava ile soğutulan yüksek basınç türbininden oluşur. F110-GE-100 motoruna ait ana bileşenlerin teknik resmi Şekil 5.2.'de gösterilmiştir. Motorun çalışma prensibi diğer turbofan motorlarla benzerdir. İlk etapta motorun ön kısmından giren hava, fan kısmına doğru gönderilerek, üç kademeli fana ulaştırılır, fan da havayı basınçlandırarak motorun kompresör kısmına doğru yönlendirir. Buradan sıkıştırılmak üzere kompresöre gelen hava, dokuz kademeli kompresör tarafından tekrar basınçlandırılarak yanma odasına sıkıştırılmış olan hava dolar. Yanma odasındaki hava, püskürtülen yakıtla karıştırılır ve yanma olayı meydana gelir. Yanma odasından çıkan yanmış ve genleşen gazlar yanma odasından sonra kompresörü döndüren yüksek basınç türbininden ve fanı döndüren alçak basınç türbininden geçer ve nozzle dediğimiz bölümden yani egzoz kısmından dışarıya bırakılır [14-24].

Gaz türbinli motorlar gücü çok yüksek sıcaklık ile üretilen basınçtan aldıkları için Jet motorları da kullanım itibariyle çok yüksek titreşimlere, basınçlarda, sıcaklıklara ve

sürtünmelere maruz kalmaktadırlar. Bu etkiler gaz türbinli motorlara aerodinamik yüklerden aşınmaya, çevresel yıpranmalardan ısıl şoklara kadar pek çok olumsuz tesir yapmaktadır. Jet motorlarının kullanım ömri kullanıldıkları uçuş saati veya çalıştıkları zamana göre değil, motorun başından geçen termodinamik ve mekanik çevrimlerin sayısına göre değerlendirilmektedir. Bu değerlendirme F110 motorlarında Toplam Gerçekleşen Çevrim, yani TAC (Total Accumulated Cycles), olarak isimlendirilir.

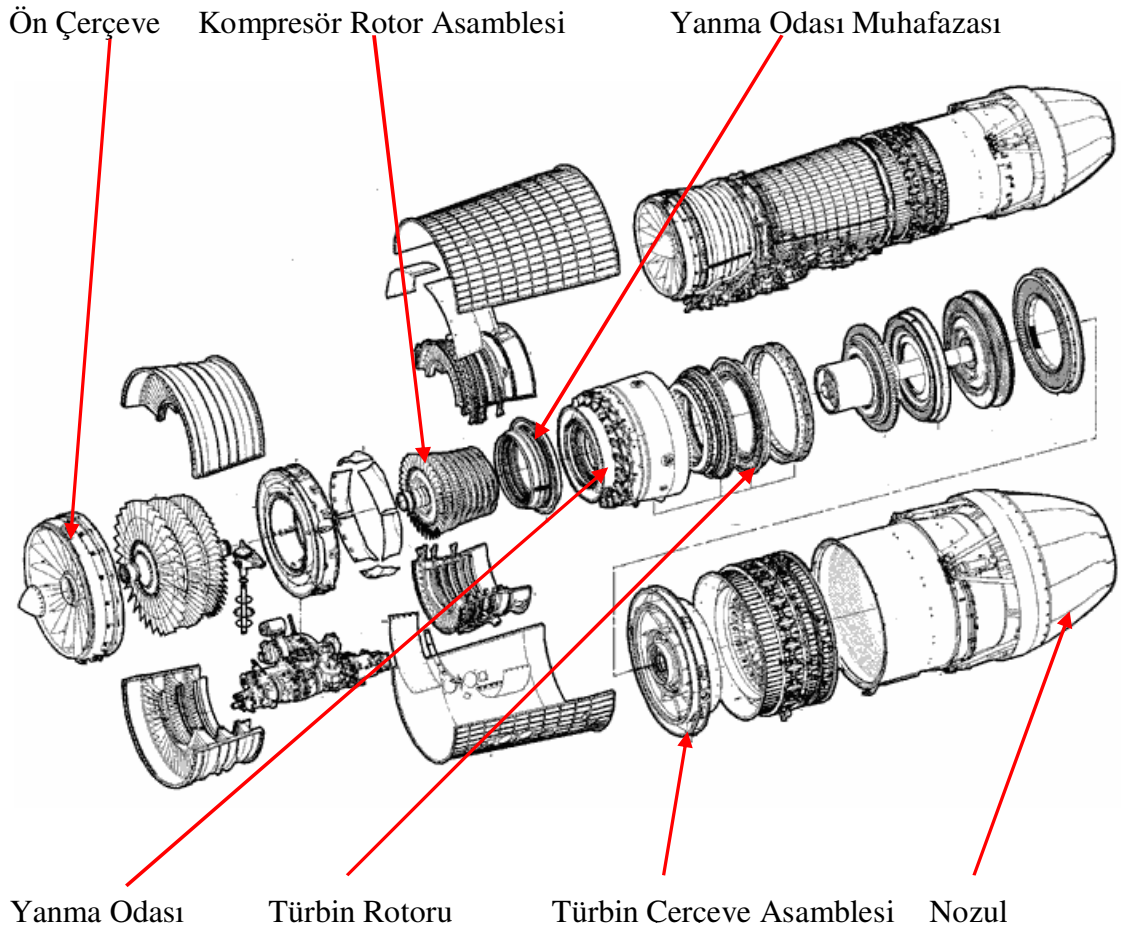


Şekil 5.1. Bir turbofan jet motorunun genel görünüşü

Motor için gerçekleşen TAC'ın hesaplanması ise gaz kolundan motora giden güç verme komutunun derecelendirilmesi şeklinde olur. Toplam gerçekleşen TAC sayısı,

F110-GE-100 motorlarında gaz kolunun rolanti konumundan, tam gaza gidip tekrar rolanti konumuna gelme sayısı olarak tanımlanır. Böylece motorun maruz kaldığı TAC sayısı belli bir değere ulaşınca motorun bazı parçaları değiştirilir bazıları ise kontrol edilir veya onarılır. TAC sayısı arttıkça kontrol ve onarım metodları da değişkenlik göstermektedir. TAC sayısı genel olarak aşağıda gösterildiği gibi hesaplanabilir [14-24].

$$TAC = KSY + 0,25 FTC + 0,25 CIC \quad (5.1)$$



Şekil 5.2. Turbofan motorunun ana komponentleri

5.1'deki eşitlikteki KSY kısa ömürlü yorulmayı, FTC tam ısıl çevrimi, CIC ise gaz kolunun tam gaz pozisyonundan 59° pozisyonuna gidiş ve dönüşünü belirtmektedir. Söz konusu motorun bakım faaliyetlerinde yapısal bütünlük programı uygulanmaktadır. Bu programın mantığında motorun ulaştığı TAC sayısı bakım yapılıp yapılmayacağını belirlemektedir. TAC sayısına göre motorun belli bölümleri sökülür kontrol ve yenileştirme işlemi yapılır. Motorun bazı kritik parçalarının ömürleri veya bakım aralıkları motor kullanıma sunulduktan sonra daha da netleşmiş ve ilk etapta uygulanan bakım aralıkları ile motorun olgunluk dönemindeki bakım aralıkları farklılık göstermiştir. Bu farklılıklar bazen kullanıcının lehine bazen de aleyhine sonuçlar doğurmuştur. Motor olgunluk dönemine ulaştığında beklenmeyen arıza ve hasarlar çok daha aza indirgenmiş ve maliyet olarak optimal değer yakalanmıştır. [14-24].

Uygulanan kontrol yönteminden biri olan fiber optik cihazlar ile motor sökülmeden motor içersinde hasara uğrama potansiyeline sahip parçaların görsel olarak kontrolü gerçekleştirilebilmektedir. Ancak TAC sayısına göre motor parçaları, detaylı bir kontrolden geçmeye muhtaç oldukları için söküm işleminden sonra gerekli kontroller yapılır. Komponentlerin sökülmesi işlemi zor bir işlemdir ve teknik kitabına göre yapılması zorunludur. Demonte durumdaki parçaların temizliğine mütakiben NDI tahribatsız kontrol yöntemleri ile hasar tespit durumları belirlenir. Burada malzemelerin yorulma çatlakları gibi çeşitli malzeme süreksizliklerinin varlığının belirlenmesi sonrasında değiştirilmesi gereken malzemeler değiştirilerek servise verilir.

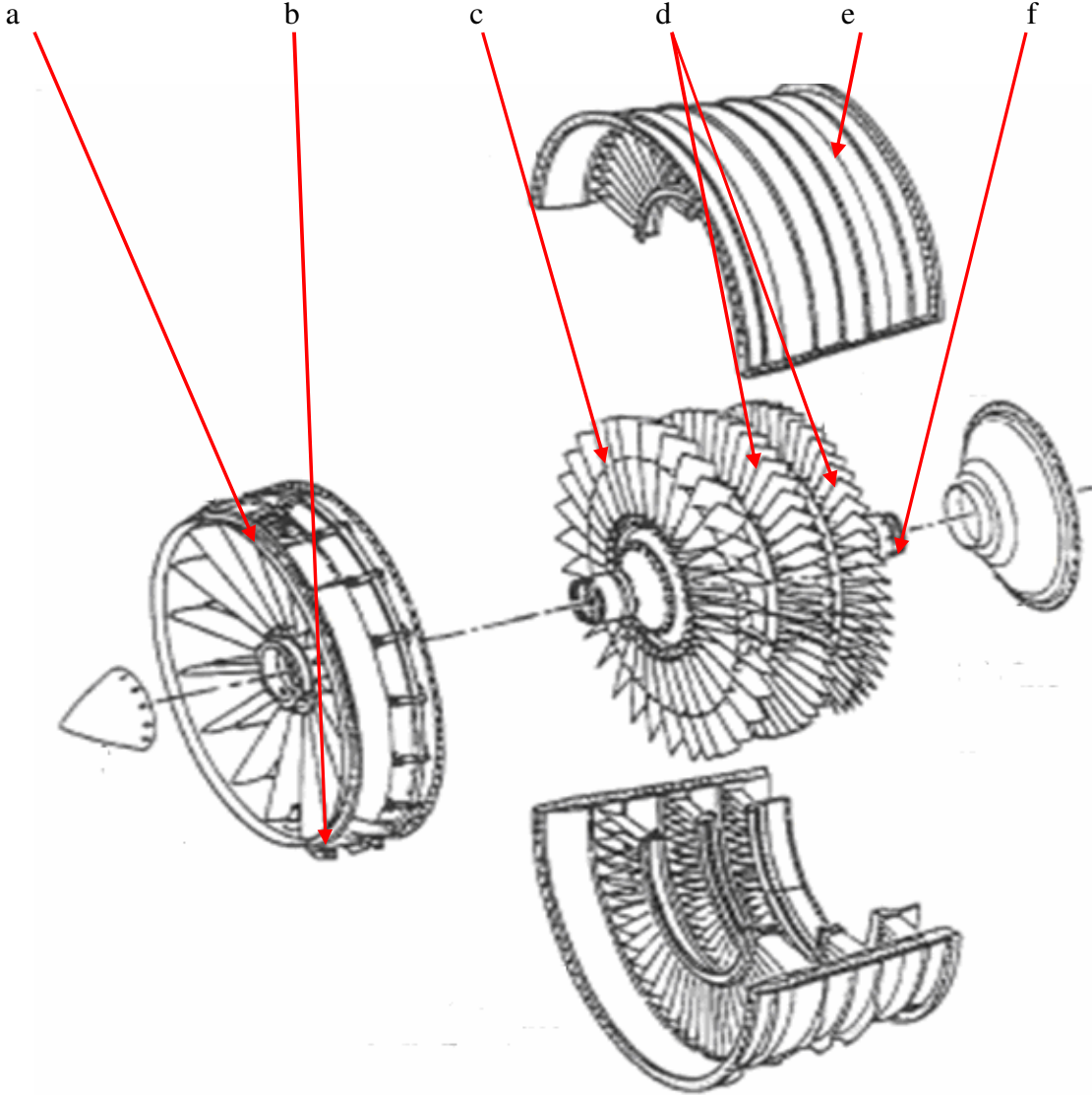
Teknik dokümanlar motor parçalarının tahribatsız kontrollerinden sonra boyutsal ve fonksiyonel olarak servis limitlerinde olup olmadıklarının belirlenmesinde klavuzluk ederler. Bu dokümanlardaki değerler dışında olan malzemeler değiştirilir. Yapılan kontrol işlemleri servis ömrünün başlangıcında uzun sürebilir ancak sonrasında hem personelin hem de motorun olgunluk dönemine ulaşmasıyla bu işlemler kolaylıkla yapılabilir. Böylece hem zamandan hem de maliyetten tasarruf edilmiş olur. Teknik kitaba göre limitler dahilinde olan parçalar yeniden kullanıma verilmek üzere montaj edilir. Bu montaj sırasında yine teknik kitapların klavuzluğu önemlidir. Motorun montajının tamamlanması sonrasında motorun genel performansına bakılması için

bremzede çalıştırılarak son testleri gerçekleştirilir. Bu testlerde başarılı olan motorlar uçağa takılabilir [8, 12, 14 - 24].

Motorun temel parçaları olan fan, kompresör, yanma odası ve türbin kısımlarının teknik resimleri sonraki sayfalarda verilmiştir. Verilen şekillerde ayrıca ana ünitelere ait parçalar isimleri ile birlikte gösterilmiş olup, bu parçalara uygulanan NDI usulleri de tanımlanmıştır [11, 19 - 24]. Bu parçalara uygulanacak tahribatsız kontrol yöntemleri, prosedürler ve gerekli teçhizatlar farklılık göstermektedirler. Bu malzemelere ait teknik kitaplarda ilk etapta uygulanabilecek NDI usulleri açıkça tarif edilmiştir. Bunun yanısıra tamamlayıcı ve alternatif olabilecek metodlardan da bahsedilmiştir.

5.1. Fan bölümü

Fan kısmındaki parçalar Şekil 5.3.'de gösterildiği gibidir.



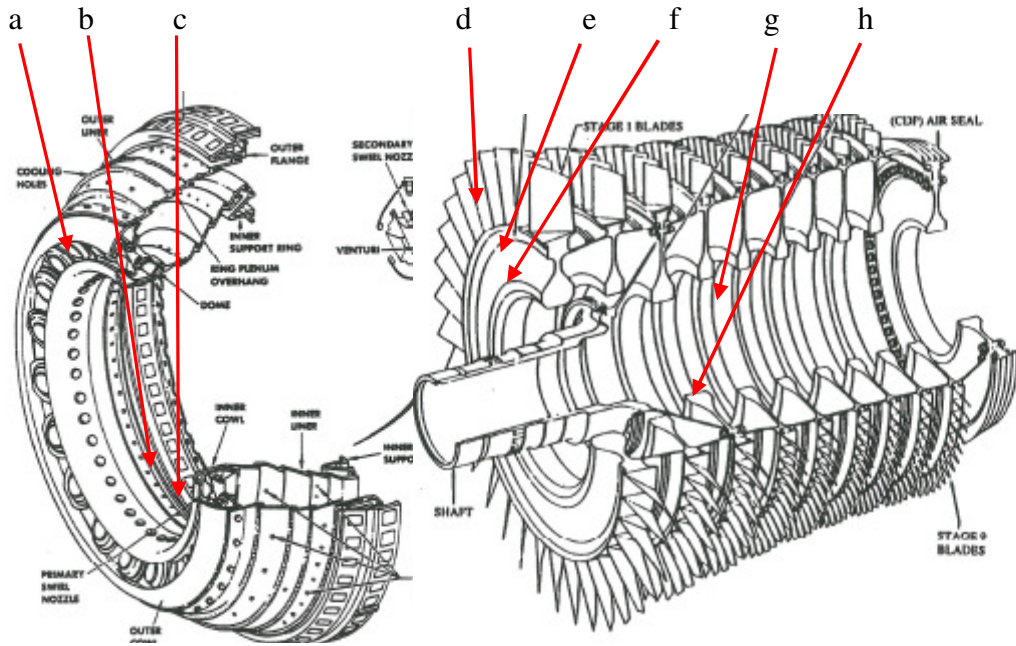
Şekil 5.3. Fan bölümündeki parçalar

- a. Ön Çerçeve (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)
- b. Ön Çerçeve Desteği (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)
- c. 1. Kademe Fan Diski (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)

- d. 1. ve 2. Kademe Fan Rotor Paleleri (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)
- e. Fan Stator Muhafazası (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)
- f. 3. Kademe Fan Diski (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)

5.2. Kompresör bölümü

Kompresör kısmındaki parçalar Şekil 5.4.'te gösterildiği gibidir.



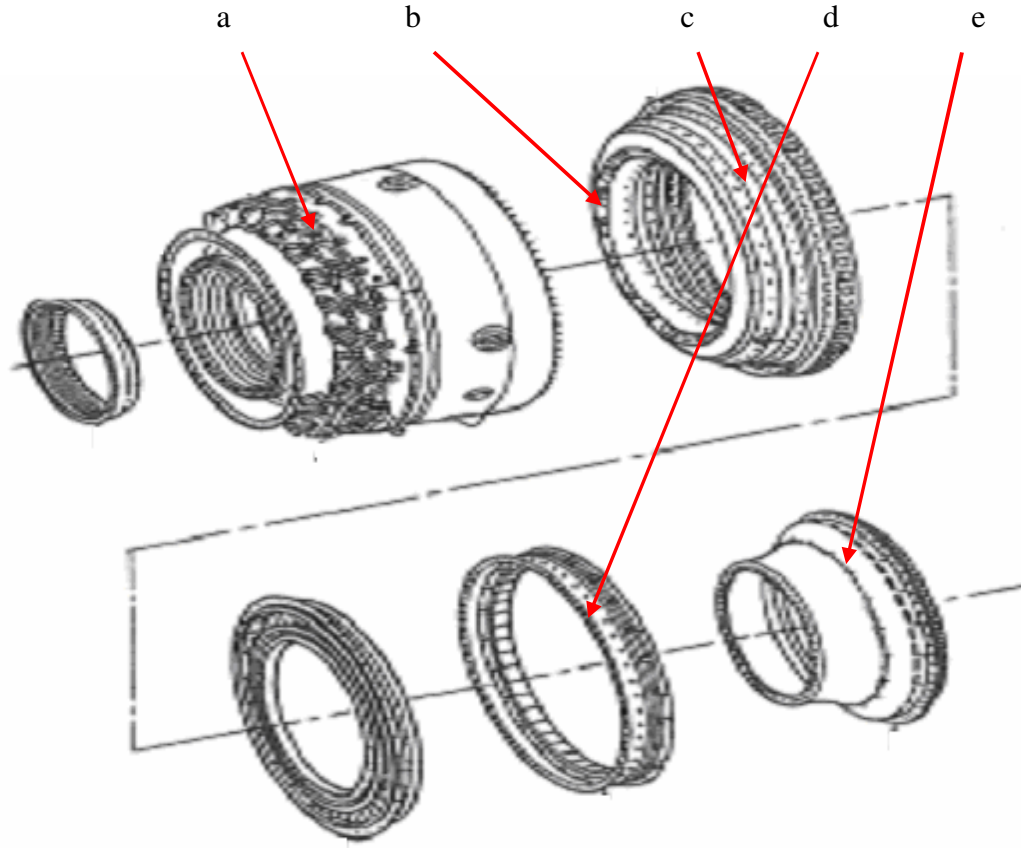
Şekil 5.4. Kompresör bölümündeki parçalar

- a. Kompresör Ön Stator Muhafazası (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)
- b. 1, 2, 3. Kademe Kompresör Stator Kanatçıkları (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)
- c. Kompresör Stator Shroud (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)
- d. 1. Kademe Kompresör Rotor Paleleri (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)

- e. 1 . Kademe Kompresör Rotor Pale Dip kısımları (Ultrasonik Kontrol ile kontrol edilir)
- f. 1, 2. Kademe Kompresör Rotor Makarası (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)
- g. 4 - 9. Kademe Kompresör Rotor Makarası (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)
- h. 3. Kademe Kompresör Rotor Diski (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)

5.3. Yanma Odası Bölümü

Yanma odası kısmındaki parçalar Şekil 5.5.'de gösterildiği gibidir.

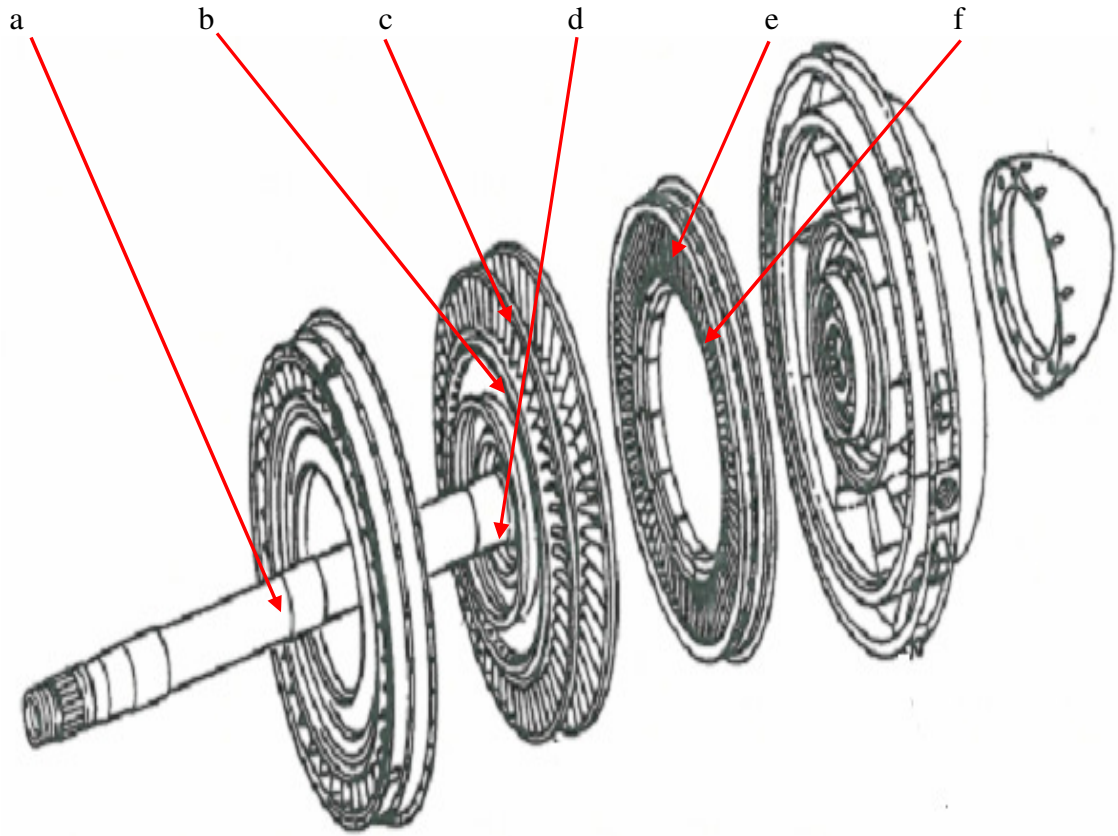


Şekil 5.5. Yanma Odası bölümündeki parçalar

- a. Yanma odası Muhafazası (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)
- b. Yanma odası Dış çerçeve kısmı (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)
- c. Yanma odası Dış Halkası (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)
- d. Arka - iç Lüle Desteği (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)
- e. Yüksek Basınç Türbin Shroud Destek Asemblisi (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)

5.4. Türbin bölümü

Türbin kısmındaki parçalar Şekil 5.6.'de gösterildiği gibidir.



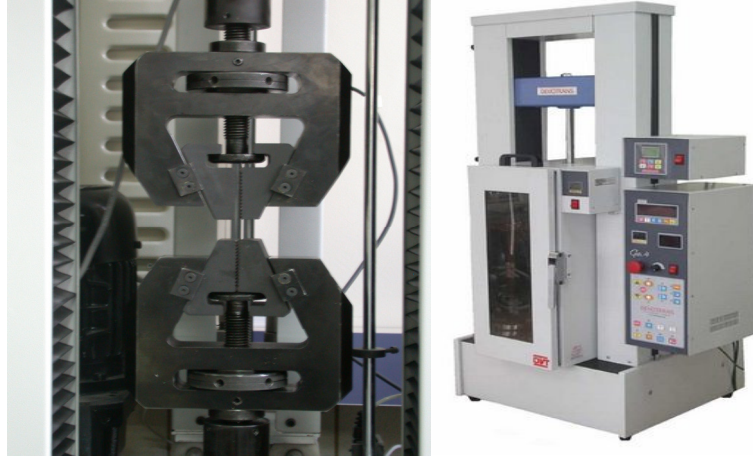
Şekil 5.6. Türbin bölümündeki parçalar

- a. Yüksek Basınç Türbin Ön Mili (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)
- b. Yüksek Basınç Türbin Rotor Diski (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)
- c. Yüksek Basınç Türbin Rotor Paleleri (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)
- d. Alçak Basınç Türbin Rotor Mili (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)
- e. Alçak Basınç Türbin 1. Kademe Diski (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)
- f. Alçak Basınç Türbin 1. Kademe Rotor Paleleri (Fulorasan Penetran Sıvı ile kontrol edilir)

Turbofan jet motorundaki kritik parçalara uygulanabilecek tahribatsız kontrol yöntemleri yukarıda bahsedilmiştir. Tüm parçalar incelendiğinde ilk etapta uygulanması gereken yöntemin gözle kontrol olduğu dikkat çekmektedir. Fan, kompresör, yanma odası ve türbin kısımlarındaki parçaların kontrolünde ikinci olarak fulorasan penetran sıvı ile kontrol yönteminin uygulanması gerektiği anlaşılmaktadır. Motorunun sıcak bölgesinde yer alan ve yüksek sıcaklığa maruz kalan parçalarında yüksek sıcaklık ve korozyon etkilerine dayanımı iyi olan nikel ve titanyum alaşımları yer almaktadır. Böylece süratli bir biçimde yüksek ısıya çıkan sonrada tekrar soğuyan ve bu işleme her uçuştan sonra maruz kalan komponentlerin uygun özelliklerinden faydalanılmış olur. Soğuk kısımlarındaki parçalarında ise yüksek basınç yüklerine ve korozyon etkilerine dayanımı iyi olan titanyum alaşımları kullanılmaktadır. nikel ve titanyum alaşımları tipindeki metal malzemelerin hemen hepsine Penetran sıvı yöntemi uygulanabilmektedir. Penetran sıvı yöntemi yorulma çatlaklarının yönlerinin önem taşımaksızın belirlenebilmesi sağlamakla kalmaz, kısmi olarak ya da tamamen sökülmüş motor parçalarının kısa sürede kontrol edilebilmesini kullanıcıya sunmaktadır. Penetran sıvı ile kontrol yöntemine alternatif olarak iletken malzemelerden yapılmış parçaların yorulma çatlak kontrolünde girdap akımları yöntemi de uygulanmaktadır. Uçak yapısal bütünlük programına riayet edilebilmesi için tahribatsız kontrol yöntemleri birbirlerinin tamamlayıcısı olarak kullanılmalı ve daima teknik kitaplara uyulmalıdır.

6. TÜRBİN İMALATINDA KULLANILAN, YÜKSEK SICAKLIK VE SÜRTÜNME ALTINDA ÇALIŞAN Tİ-6AL-4V MALZEMESİNİN YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Bu bölümde şimdiye kadar değinilen jet motorlarında görülen yorulma hasarının oluşumuna yönelik testler yardımıyla yapılan uygulamalardan bahsedilecektir. Şekil 6.1.'de testlerin yapıldığı 22.2 kN'luk test cihazı görülmektedir.



Şekil 6.1. 22.2 kN'luk Servohidrolik Test Cihazı.

Yapılan testlerde dört farklı kombinasyon kullanılmış olup, bunlar;

- Oda sıcaklığı şartlarında normal yorulma deneyleri,
- Oda sıcaklığı şartlarında sürtünme yorulması deneyleri,
- Yüksek sıcaklık şartlarında normal yorulma deneyleri,
- Yüksek sıcaklık şartları altında sürtünme yorulma deneyleri olarak gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneylerde kullanılan 22 kN'luk Servohidrolik test cihazı büyük kolaylık sağlamıştır. Bu kolaylıklar arasında ilk sayılabilecek özelliklerden biri, maksimum ve

minumum yüklemelerin tek bir kez girilerek malzeme kırılana kadar herhangi bir müdahaleye gerek kalmadan devam ettirebilmesidir. Bu özelliğe ilave olarak testlerin hızının yani saniyede uygulanan yüklerin frekansının arttırılabilmesidir. Örneğin yapılan testler başlangıçta 1 Hz olarak başlatılmış ancak kırılma olana kadarki süreç çok uzun sürmüştür, bunun yerine frekans yükseltildiğinde yani 10 Hz çıkarıldığında testler daha çabuk bitirilebilmiş ve vakit kaybı önlenmiştir. Frekansın yükseltilmesi durumunda ise test sonuçlarına herhangi bir etki yaşanmamıştır. Bir diğer uygulama kolaylığı sağlayan özellik ise sürtünme pedlerinin sabitlenmesi için test cihazında bulunan aparatlar olmuştur. Bu aparatlar sayesinde sürtünme pedleri istenildiği ölçüde numuneye etki ettirilebilmiştir. Ancak uygulamada pedlerin aynı hizaya getirilebilmesinde zorluklar yaşanmış ve hizalama işlemi her sürtünme testinden önce elle kontrollü olarak uygulanmıştır.

Sıcaklık kontrolü ise uygulamayı zorlaştıran bir başka konu olarak karşımıza çıkmıştır. İlk etapta sıcaklık ölçümü ile ilgili değişik alternatifler akla gelse de daha sonra ısı çiftleri yardımıyla bu işlemin yapılabileceğine karar verilmiştir. Bu karardan sonra ise ısı çiftlerinin numuneye nasıl ekleneceği konusu karşımıza çıkmıştır. Bu duruma yönelik kaynak yapma yolu denenmiş ancak numuneye verdiği zarar yüzünden testler başarısız sonuçlanmıştır. Bunun sonucunda numuneye kaynak yapma yönteminden vazgeçilmiş ve kuvvetli bir yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırıcının malzemeye herhangi olumsuz bir etkisi olmamıştır. Sürtünme uygulanan testlerde ise ısı çifti sıcaklık ölçülmesi amacıyla sürtünme pedlerine kaynak yapılmıştır. Bu durumda sürtünme pedleri ile numune arasında bir sıcaklık ilişkisi kurulmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu ilişki ise elle yapılan ölçümler neticesinde ortaya konmuştur. Elle yapılan ölçümlere göre numune ile sürtünme pedleri arasında 10 °C'lik bir fark olduğu gözlenmiştir. Yani numunenin 250 °C'ye çıkabilmesi için sürtünme pedlerinin 240 °C'ye çıkarılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Yapılan testlerde AQAP- 2110 kalite standartları uygulanmıştır. Bu standartlar genel olarak tasarım, geliştirme ve üretim için NATO kalite güvence gereklerinden oluşmaktadır. AQAP 2110, NATO'nun kalite gereklerini içerir. AQAP 2110, bir sistemin şartlara uygun olarak kurulması, dokümanite edilmesi, uygulanması, muhafaza edilmesi, değerlendirilmesi ve iyileştirilmesini gerektirmektedir. AQAP 2110

temel olarak ISO 9001:2000 Kalite Yönetim Sistemleri–Gerekler, ISO 9000:2000 Kalite Yönetim Sistemleri–Esaslar ve Sözlük ve ISO 10012-1 Ölçüm Teçhizatı için Kalite Güvence Gerekleri dokümanlarını baz almaktadır.

6.1. Yüksek Sıcaklıklardaki Sürtünme Yorulmasının Konfigürasyonu

Bu çalışmada öncelikle numune maksimum yüklemelerde dahi sabit kalacak bir biçimde Şekil 6.1.'de de görüldüğü gibi 22.2 kN servohidrolik test cihazına bağlanmıştır. Sürtünme sabitleyicisi aparat ile testler boyunca sürtünme pedleri tarafından numuneye uygulanan normal yükleme (P) sürekli ve sabit tutulmuştur. Teğetsel yükleme ise eksenel yüklemeye bir tepki kuvveti şeklinde oluşan kuvvet olarak ortaya çıkmıştır. Tipik bir eksenel yükleme, $\frac{Q_{min}}{Q_{max}}$ oranı yaklaşık olarak - 0,3 ve - 0,4 aralığında gerçekleşmiştir. Bununla birlikte eksenel yükleme de servohidrolik test cihazının yardımıyla değişik değer aralığında tutulmuştur.

Sürtünme yorulması testleri boyunca numuneye uygulanan gerilim ve kuvvetler kontrol ve kayıt edilebilmesi amacıyla test cihazının monitöründen takip ve kontrol edilmiştir.

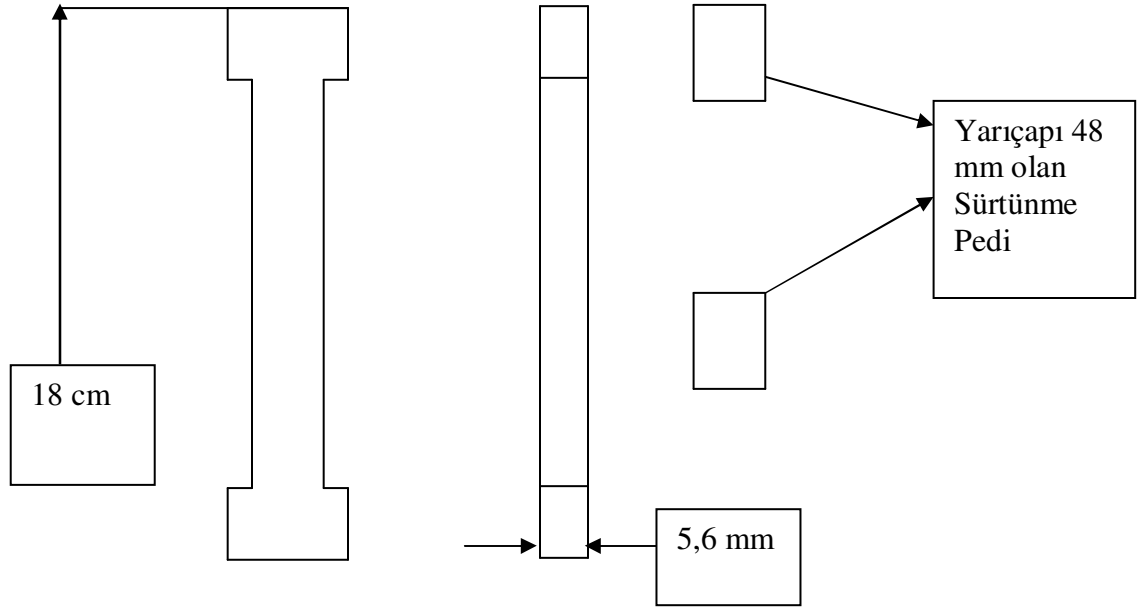
Peryodik yüklemeler numuneye uygulandığında, sürtünme pedleri de buna paralel olarak numune ile temas eder (sürtünme başlar) ve sürtünme yüzeyinde bir etkileşim meydana gelir. Bu nedenden dolayı tüm testlerden önce sürtünme pedlerinin sürtünme yüzeyine sağlıklı bir biçimde temas edip etmediği kontrol edilmiştir. Böylece testlerde elde edilen değerlerin gerçekçi ve doğru olması sağlanmıştır.

Servohidrolik test cihazının spot lambaları Şekil 6.1.'de gösterilmiştir. Bu spot lambalar sayesinde özellikle sürtünme olan bölge istenen sıcaklığa getirilebilmiştir. Spot lambalar istenen bölgeyi istenen sıcaklığı getirebilmek için özel olarak görev yapmıştır. Spot lambaların tasarımı gereği istenen bölgeye odaklanarak yalnızca o bölgenin sıcaklığını istenen değere kadar artırabilmektedir. Yani tüm mekanı değil istenen malzeme, kalıp, sıvı vb. özel olarak ısıtılabilir. Yani tüm mekanı değil istenen malzeme, kalıp, sıvı vb. özel olarak ısıtılabilir.

σ_{\max} maksimum aksel gerilmeyi ifade etmekle birlikte saniyede 200 kez (200 Hz) veya 1 kez (1 Hz) tekrarlanmak koşulu ile 350 MPa ile 600 MPa arasında değişkenlik göstermiştir. Ancak yapılan testlerde genelde 1 Hz kullanılmamıştır, çünkü 1 Hz'deki testler çok uzun sürebilmektedir. Aksel yüklemdeki en düşük değer ile en yüksek yüklemenin oranı 0,1 olarak gerçekleşmiştir.

Test cihazının kontrol mekanizması tarafından testler boyunca uygulanan kuvvet ve gerilme oranları ve periyotları oluşabilecek herhangi bir hataya karşı takip edilmiş ve korunmuşlardır.

Sürtünme Yorulması deneyinde kullanılan malzemelere ait fiziksel özellikler olarak; numunenin kalınlığı $2b = 4,8$ mm, genişliği $w = 5,6$ mm, numunenin kesit alanı $A = 26,88$ mm² olarak belirlenmiştir. Sürtünme pedlerinin yarıçapı $r = 48$ mm olarak tanımlanmış olup, Şekil 6.2.'de gösterilmiştir.

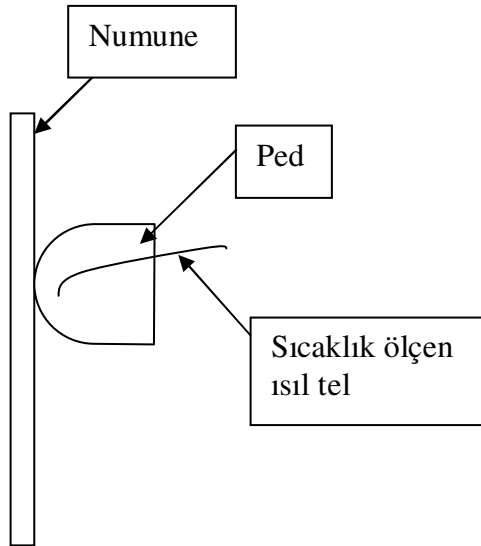


Şekil 6.2. Testlerde Kullanılan Numune ve Pedler.

Sürtünme yorulmasında kullanılan numune ve sürtünme pedlerinin her ikisinde Ti-6Al-4V (Alüminyum alaşımlı Titanyum)'dan imal edilmiş malzemelerdir. Böylece gerçek şartlarda kullanılan disk ve kanatçık malzemeleri ile aynı şartlar sağlanmıştır. Bu malzemelerin seçilmiş olmasının asıl nedeni ise hem Türbin disklerinin hem de türbin kanatçıklarının bu malzemeden imal ediliyor olmasıdır.

Bu malzemeye ait elastisite modülü deney maksimum sıcaklığı koşullarında (250 °C) $E = 95 \text{ GPa}$ 'dır.

Sıcaklık ölçmek için kullanılan ısı çiftleri, sürtüme bölgesinin sıcaklığını tespit edebilecek şekilde sürtünme pedlerinin orta bölgesine yerleştirilmiş olup, Şekil 6.3.'de sunulmuştur.



Şekil 6.3. Sıcaklığın kulplarla ölçülmesini gösteren diyagram.

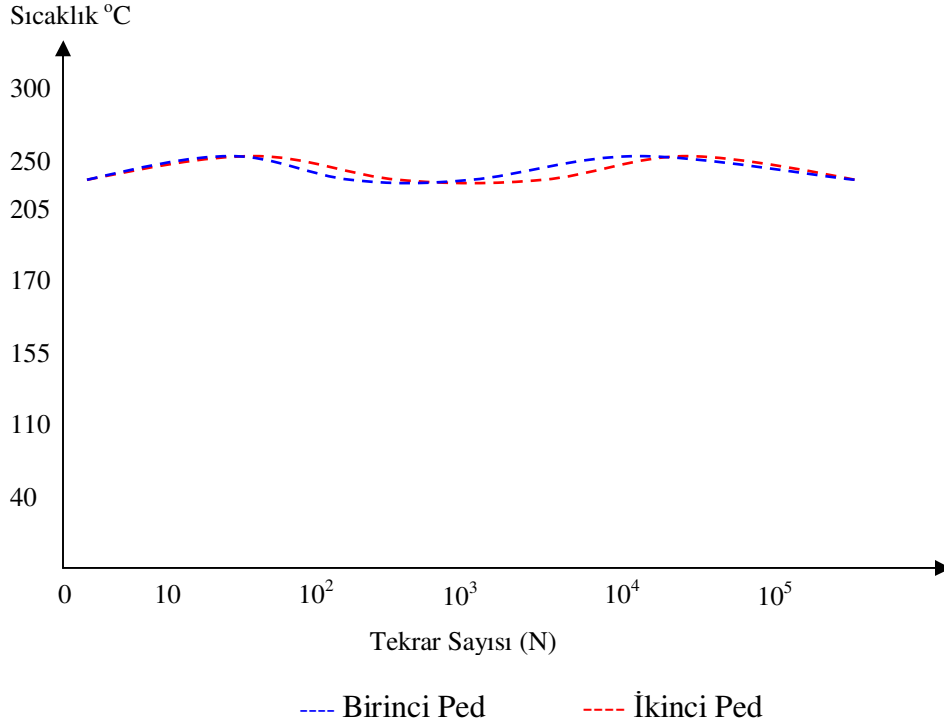
Şekil 6.3.'de de görüldüğü gibi ısı çiftlerinin sürtünme pedine yerleştirilmiş olmasının nedeni olarak numune üzerine yerleştirildiğinde numunenin o bölgesinde hasara yol açması ve testlerin sağlıklı yapılmasını engellemesi olarak açıklanabilir.

Ayrıntılı olarak açıklamak gerekirse, ısı çiftler numuneye kaynak yapılmak suretiyle tutturulmakta bu da numunede hasara yol açmakta ve bu hasar yükleme tekrarlarının çok erken dönemlerinde kırılmasıyla son bulmaktadır. Tüm bu nedenlerden dolayı sıcaklık ölçümü indirekt metod (Sürtünme pedleri vasıtasıyla) kullanılarak yapılmıştır.

Burada yapılan ölçümlerin hatalı çıkmaması adına yapılan kontrollerde pedlerdeki sıcaklığın 240 °C iken numunedeki sıcaklığın 250 °C olduğu gözlenmiştir. Bu sıcaklık değişimleri ısı çiftler vasıtasıyla da monitörde izlenmiştir. Pedlere ait sıcaklık değişimi ise Şekil 6.4.'de gösterilmiştir.

Şekilden de anlaşılacağı gibi testler boyunca sıcaklık ± 3 °C'lik farkla 250°C 'de tutulmuştur. Sıcaklıktaki ± 3 °C'lik oynama test tezgahının bulunduğu ortamdaki dış etmenlerden (rüzgar, nem, odanın kapısının açılıp kapatılması vb.) kaynaklanmaktadır.

Burada açıklanması gereken önemli bir nokta da testten etkin sonuçlar almak için numunenin makul bir süre önceden test sıcaklığına getirilmesidir. Burada test tezgahının üzerinde bulunan infrared ısıtıcı spot lambalar bize oldukça yardımcı olmuştur. Bu lambalar test sıcaklığına ulaşmamız için kullanılmıştır. Şekil 6.5.'deki şematik diyagram da incelendiğinde numune ve sürtünme pedlerinin her iki yüzüne bakan iki adet spot lambanın yer aldığı görülmektedir.

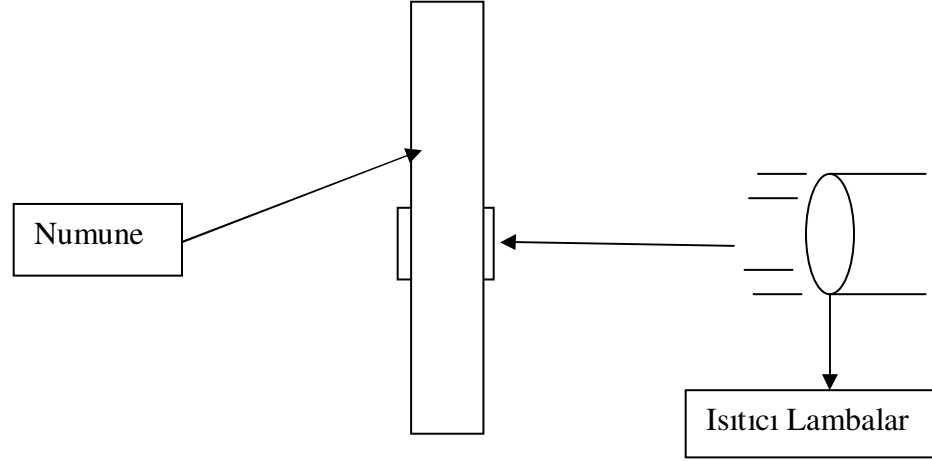


Şekil 6.4. Test Konfigürasyonunda yer alan Pedlerin üzerindeki sıcaklık eğrileri.

Lambaların ısınma seviyesi güç kontrol panelindeki düğmeler ile ayarlanabilmektedir. Bu lambalar istenildiği takdirde bir kaç saniyede istenilen sıcaklığı verebilme kapasitesindedir. Spot lambalardan yayılan infrared enerji değişik uygulama koşullarındaki ihtiyaçlara cevap verebilmektedir. Yayılan infrared enerjinin hedeflenen bölgede tutulabilmesi (odaklanabilmesi) için Spot lamba ile birlikte reflektör tablalar da kullanılır.

Sıcaklık sinyalleri hakkında bir doğrulama yapabilmek adına numune ile aynı boyutta bir taklit ile denemeler yapılmıştır. Bu denemeler boyunca bu taklit numune üzerindeki altı noktada birden sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu denemeler numune üzerindeki kabul edilebilir (makul) bir sıcaklık profiline ulaşmak için yapılmıştır.

Ölçülen sıcaklık profili Şekil 6.6.'da gösterilmiş olup, böylelikle hedeflenen bölgedeki sıcaklık değeri sürekli aynı dilimde tutulmuştur. Numunenin merkezindeki yani sürtünme pedleri ile numune arasında kalan bölgenin sıcaklığının özellikle aynı olması sağlanmaya çalışılmıştır.

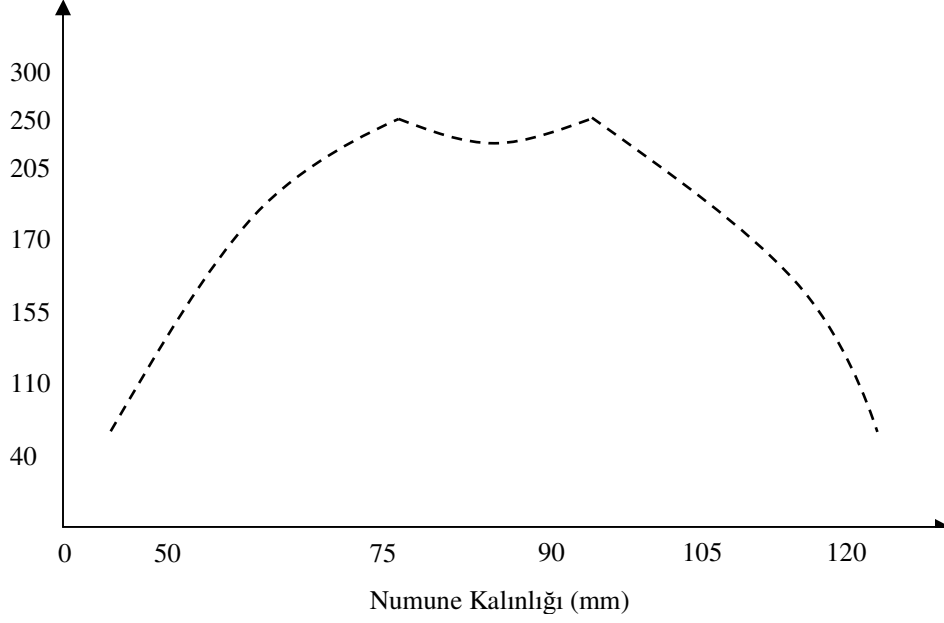


Şekil 6.5. Isıtıcı Lambaların Konfigürasyonu.

$N_{Sıcaklık\ ^\circ C}$ ma deneyleri (sürtünme olmadan) yine aynı deney tezgahında gerçekleştirilmiştir. Bu konfigürasyonda ise sıcaklık ölçümü için endirect metod yerine direkt metod kullanılmıştır. Bu çalışmada ise sıcaklığın ölçülmesinde bazı aksaklıklarla (özellikle ısıl çiftlerle ilgili vb.) karşılaşılmıştır. Isıl çiftlerin numuneye tutturulması için yüksek sıcaklığa dayanıklı yapışkan kullanılmıştır sıcaklığı artırmak içinse yine spot lambalar kullanılmıştır.

6.2. Sürtünme Katsayısı

Sonlu elemanlar analizinde kullanmak için Sürtünme katsayısı tanımlanmak ve tespit edilmek zorundadır, böylece bu bilgi sonlu elemanlar yönteminde kullanmak için bir girdi olarak kullanılabilir. Sürtünme katsayısı tanımlanması için bazı deneyler uygulanmıştır. Bu deneyler boyunca doğru sonuçlar almak için numune yerinden çıkarılarak kontrol edilmiştir. Bir kaç denemenin ardından uygulamanın doğru yapıldığına karar verilmiş ve test cihazındaki fonksiyonlar yardımıyla sürtünme katsayısı da belirlenmiştir.

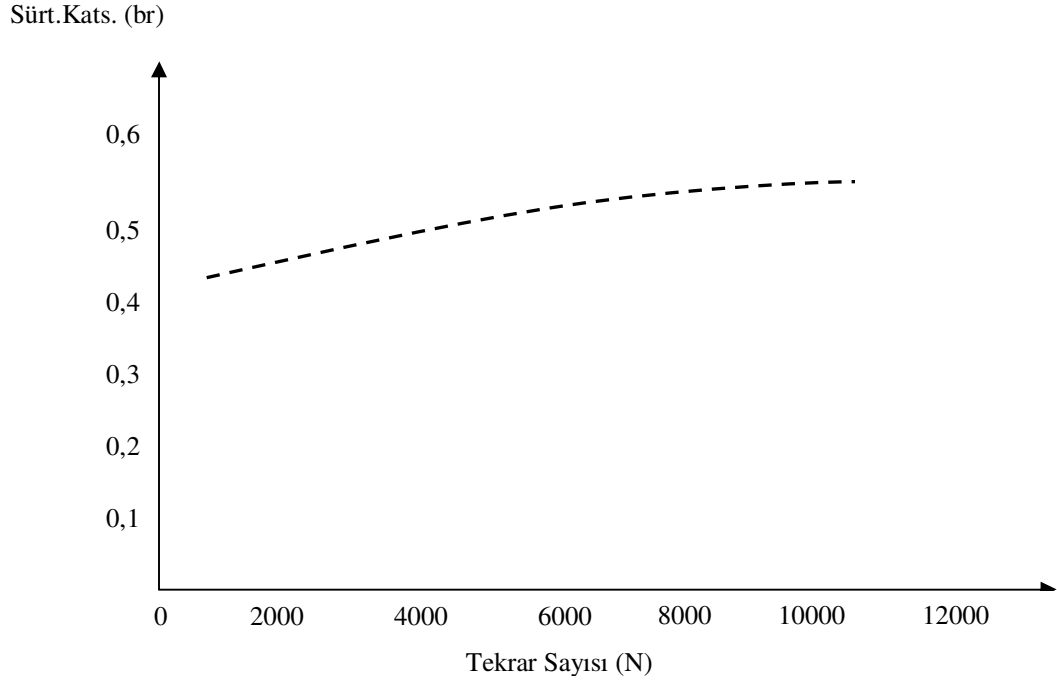


Şekil 6.6. Numune üzerindeki sıcaklık analizi. (Burada numunenin toplam uzunluğu 180 mm'dir.)

Eksenel yüklemeler uygulanmaya başlanırken sabit olana kadar yükseltilmiştir. Sabit bir değere ulaştıktan sonra sürtünme katsayısının belirlenmesi için bu değer kullanılmıştır.

Yükleme tekrarlarının ilerleyen safhalarında sürtünme katsayısının arttığı görülmüştür. Bu yüzden sürtünme katsayısının belirlenmesi işlemi için, numuneye etki eden yüklemelerin sabit bir değere ulaşması ve tekrarlamaların belli bir safhaya gelmesi beklenmiştir.

Bu çalışmada sürtünme katsayısı deney ilk aşamasında ölçülmüştür, daha sonra 5.000 tekrarda ve 10.000 tekrarda yeniden ölçülmüştür. Özellikle dikat çekici olarak sürtünme katsayısı 10.000 tekrardan sonra sabit bir değere ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu gözlemlerin sonucu şekil 6.7.'de verilmiştir. Bu uygulamaların sonucu olarak sonlu elemanlar analizinde girdi olarak kullanmak üzere sürtünme katsayısı 0,5 olarak alınmıştır.



Şekil 6.7. Yüksek sıcaklık altındaki testlerde tekrar sayısına karşı sürtünme katsayısının değişimi.

6.3. Yükleme Değerleri

Bu çalışmada belirlenen aksenal ve teğetsel yüklemelerin bazıları sonlu elemanlar analizinde girdi olarak kullanılmıştır. Özellikle aksenal yüklemeler 22.2 KN'luk servohidrolik test tezgahının ekranından takip ve kayıt edilmiştir. Teğetsel yükleme aksenal ve normal yüklemenin bir bileşeni olan bir değerdir.

$$Q = \frac{F_A - F_F}{2} \quad (7.1)$$

Buradaki parametreler test cihazındaki ekrandan alınan değerlerdir. Numuneye iki tane sürtünme pedi etki ettiğinden dolayı formülde 2 ye bölünmüştür. Daha önce de bahsedildiği gibi $\frac{Q_{\min}}{Q_{\max}}$ oranı kabaca sabit bir değerde devam etmiştir.

Normal yükleme (P) oluşturmak amacıyla Şekil 1.2.'de de görüldüğü gibi iki adet yay kullanılmıştır. Bu yükleme testler boyunca sabit tutulmaktadır ve ekrandan izlenmektedir. Normal yükleme, numunenin dayanabileceği maksimum değer olan 1.33 kN değerinde sabit olarak testler boyunca uygulanmıştır. Tablo 6.1.'de yükleme değerleri ve kırılma tekrar sayılarına ilişkin bilgiler özetlenmiştir.

Bu tabloda deneyde kullanılan veriler özetlenmiş olup tablodan, kullanılan numune sayısına, aksenal gerilmedeki değişmeye, $\Delta\sigma_{axial}$, kırılma olana kadar gerilme tekrar sayısına, N_f , maksimum aksenal yüklemeye, $\sigma_{axial,max}$, minimum aksenal yüklemeye, $\sigma_{axial,min}$, maksimum teğetsel yüklemeye, Q_{\max} ve minimum teğetsel yüklemeye, Q_{\min} , ulaşılabilir. Testlerdeki maksimum gerilme tekrar sayısı 2×10^6 'yı geçmemiştir.

6.4. Kırılma Bölgesi

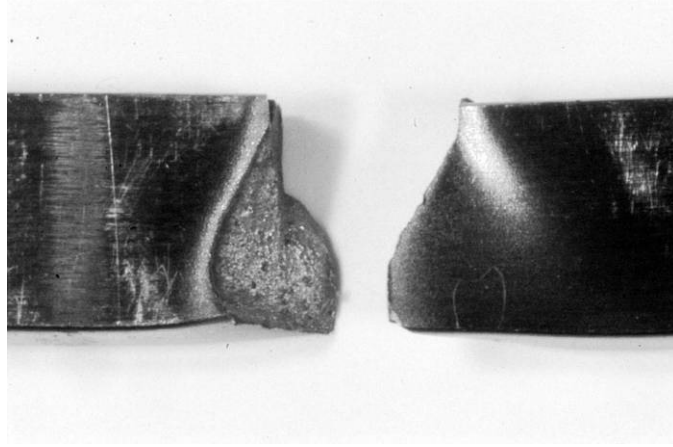
Bu bölümde kırılma bölgesi kabaca gözlemlenmiştir. Daha önceki çalışmalar sürtünme bölgesindeki malzeme kayıplarının yaşandığı bölgelere yakın yerlerde gerçekleşmiştir. Malzeme kayıplarının olduğu bölge incelendiğinde; gerilemenin maksimum olduğu yönde kayıpların yoğunlaştığı sonucuna ulaşabiliriz. Kırılma bölgesinin yerinin tam olarak tahmin edilmesinin neredeyse imkansız olması nedeniyle testler numulerin kırılmasına kadar devam ettirilmiştir.

Bu çalışmadaki sürtünme alanı $a = 0,9$ mm olarak ölçülmüştür. Böylece sonlu elemanlar yönteminde kullanılacak bir değer daha ortaya çıkmış oldu. Sonuç olarak kırılma bölgesi sürtünmenin en çok meydana geldiği bölgede oluşmaktadır.

6.5. Kırılma Açısı

Testler kapsamında gözlemlenmeye çalışılan bir başka sonuç da meydana gelen kırılmanın açısının bulunabilmesidir. Sürtünme yorulma deneyleri boyunca iki farklı türde kırılma belirlenmiştir.

Bunlar birincil kırılmalar ve ikincil kırılmalardır. Birincil kırılma dediğimiz durum numunenin kırılmasıyla sonuçlanan durumdur. Diğer kırılma tipi ise numunenin kırılmasına yol açmasa da sürtünme yüzeyi boyunca oluşan ve elektron mikroskobu ile bulunabilen kırılma (koyu çatlak) tipidir. Ancak yapılan testler genel olarak birincil kırılma ile sonuçlanıncaya kadar devam ettirilmiş ve Şekil 6.8.'de birincil çatlak meydana gelen numune gösterilmiştir. Gözle yapılan incelemeler çatlak başlangıcı açısının $\theta = 45^\circ$ derece olarak olduğunu göstermiştir.



Şekil 6.8. Kırılan numunenin görünümü.

6.6. Farklı Kombinasyonlarda Yapılan Testlerin Karşılaştırılması

Bu bölümde sürtünme yorulması ve normal yorulma bilgileri, yükseltilmiş sıcaklıklarda ve oda sıcaklığında ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda uygulanan aksenal yüklemeler açısından çıkarılan sonuçlar da aşağıdaki şekillere yansıtılmıştır.

Söz konusu şekillerdeki grafiklerde sürtünme yüzeyinde oluşan diğer gerilmeler (artık gerilmeler vb.) göz önünde tutulmayarak yalnızca belirlenen iki yükleme karşılaştırılmıştır.

Bilgileri grafiklere aktarmak amacıyla yalnızca eksenel yüklemekten kaynaklanan dağılımlar göz önüne alınmıştır, ancak bu bilgilerin nadiren de olsa yanıtıcı olma olasılığı vardır.

Yapılan testlerin geneli değerlendirildiğinde ise yükseltilmiş sıcaklıklardaki yorulma değerleri oda sıcaklığındaki yorulma değerlerinden bir miktar daha erken gerçekleştiği görülmüştür. Ancak bu durumun malzeme açısından çok önemli bir dezavantaj olmadığı değerlendirilmektedir.

Bunun yanında Şekil 6.9.'da gösterildiği gibi yapılan birkaç yorulma deneyinde yüksek sıcaklıklardaki değerlerle oda sıcaklığındaki değerlerin bir kısmı hemen hemen aynı çıkmıştır. Şekil 6.10. ve Şekil 6.11.'de, yükseltilmiş sıcaklık şartlarında yapılan deneylere ilişkin sonuçlar verilmiştir. Bu sonuçlar efektif yükleme değeri ve eksenel yükleme farkı için ayrı ayrı kıymetlendirilmiştir. Bu bilgiler ışığında hazırlanan ve tablo 6.1.'de verilen tabloda yükseltilmiş sıcaklıklarındaki yorulma deneyi sonuçları gösterilmiştir. Bu tablodaki değerler, eksenel yüklemelerdeki değişiklikleri $\Delta\sigma_{axial}$, toplan kırılana kadar olan yükleme tekrar sayısını N_f , maksimum eksenel yükleme değerini $\sigma_{axial,max}$, minimum eksenel yükleme değerini $\sigma_{axial,min}$, vermektedir.

Burada belirtilmesi gereken nokta daha önce de belirtildiği gibi en fazla yapılan tekrar sayısı 2×10^6 olarak gerçekleşmiş olmasıdır. Bu tekrar sayısına kadar kırılmayan numunelere uygulanan yüklemeler ve sonuçlar çalışmanın sonuçlarının dışında bırakılmıştır.

Bu çalışmanın tüm safhalarında sabit kalmak kaydıyla R değeri 0,1 olarak gerçekleştirilmeye çalışılmış ve kısmen başarılı olmuştur. R oranının tam olarak gerçekleşmediği durumlar da olmuştur ancak bu uygulamada elde olmayan sebeplerden kaynaklanmıştır.

Bir başka parametre olan m , malzeme sürtünme parametresi olup, bu çalışmada daha önce de belirtildiği gibi 0,55 olarak belirlenmiştir. Bu parametreler eşliğinde efektif yükleme değeri yükleme tekrar sayısına göre grafiği çıkartılmıştır.

Bir başka karşılaştırma metodu olarak yükleme aralığı $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ olarak hesaplanmaktadır. Bu metoda göre uygulanan yüklerin en büyüğü ile en küçüğünün farkı alınarak bir delta yükleme değeri bulunmuştur. Bulunan delta yükleme değeri yükleme tekrar sayısı ile karşılaştırılarak bir grafikler elde edilmiştir. Aşağıda verilen grafikler bu paralelde, yükseltilmiş ve oda sıcaklığı şartlarında, normal ve sürtünme yorulması bilgileri ile numune kırılana kadar tekrarlanan yükleme sayısı karşılaştırılarak verilmiştir.

Ancak burada değinilmesi gereken nokta ise bilgileri verilen testlerin saniyede gerçekleşen periyot (1-200 Hz) sayısı farklı olarak yapılmış olmasına rağmen bu testlerde yer alan sonuçlara herhangi bir etkisi olmamıştır.

Sonuç olarak sürtünme yorulmasına ilişkin oda sıcaklığı ile yükseltilmiş sıcaklıklardaki ayrı ayrı yapılan testler incelendiğinde, yükseltilmiş sıcaklıklardaki deney numunelerinin kırılma ömürlerinin daha kısa olduğu değerlendirilebilir.

250 °C sıcaklıkta yapılan deneylere göre bu seviyedeki bir sıcaklığın sürtünme yorulması davranışına çok büyük bir etkisi olmadığı değerlendirilebilir yanlı bir değerlendirme olmaz.

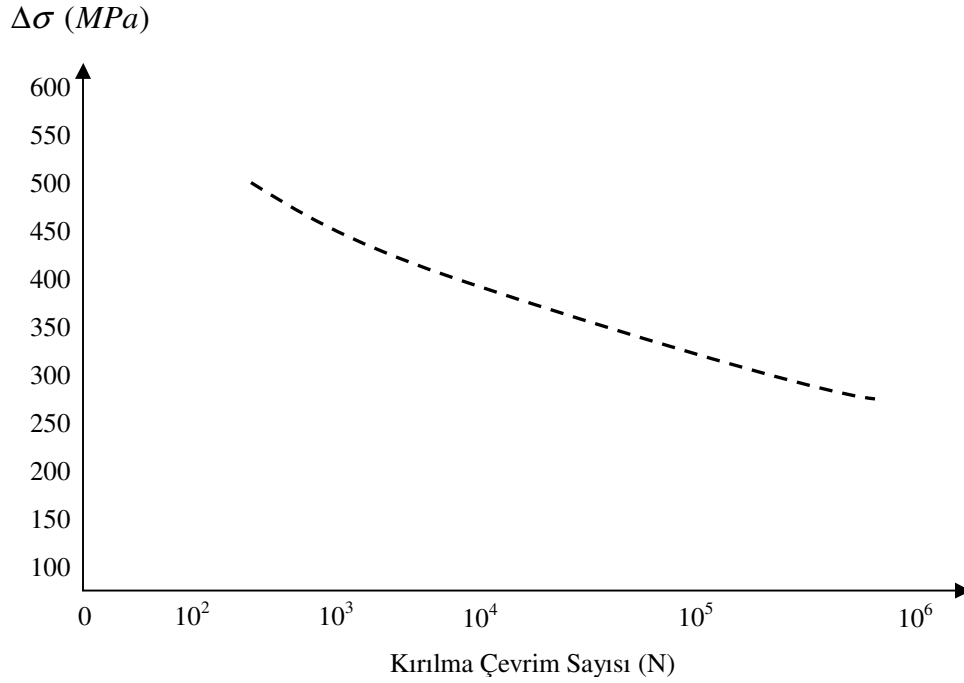
Malzemenin yorulmasına sürtünme, sıcaklıktan daha fazla etki etmiştir. Aynı zamanda $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ bağlı karşılaştırma, bu değerlendirmelere Şekil 6.9, 10, 11, 12’de de gösterildiği gibi paralel çıkmıştır .

Çizelge 6.1. Yüksek Sıcaklıklardaki Sürtünme Yorulmasının Test Sonuçlarının Özet Tablosu

Numune No.		Kırılma Yükleme Sayısı Test Sonuçları (N)	Kırılma Yükleme Sayısı ANSYS Analizi Sonuçları (N)	ANSYS Sonuçlarının Test Sonuçlarına Oranı	Maximum Eksenel Yükleme (MPa)	Minumum Eksenel Yükleme (MPa)
1	Numune 1	70.000	63.876	0,91	550	65
2	Numune 2	1.816.327	1.804.259	0,99	434	57
3	Numune 3	208.956	203.546	0,97	495	63
4	Numune 4	256.798	249.987	0,97	442	78
5	Numune 5	178.934	171.764	0,96	564	91
6	Numune 6	297.865	292.539	0,98	432	75
7	Numune 7	2.109.897	2.078.623	0,98	315	42
8	Numune 8	3.256.754	3.181.163	0,97	350	49
9	Numune 9	148.876	139.088	0,93	774	77
10	Numune 10	368.791	357.982	0,97	639	64
11	Numune 11	3.568.904	3.518.711	0,98	541	54

Bu şekillerden Şekil 6.9.'da yüksek sıcaklık şartlarındaki yükleme aralığı ile kırılma tekrar sayısı ($\Delta\sigma$ ile N_f) karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada grafikten de anlaşılacağı gibi, yükleme aralığı azaldığında malzemenin ömründe de bu duruma paralel olarak

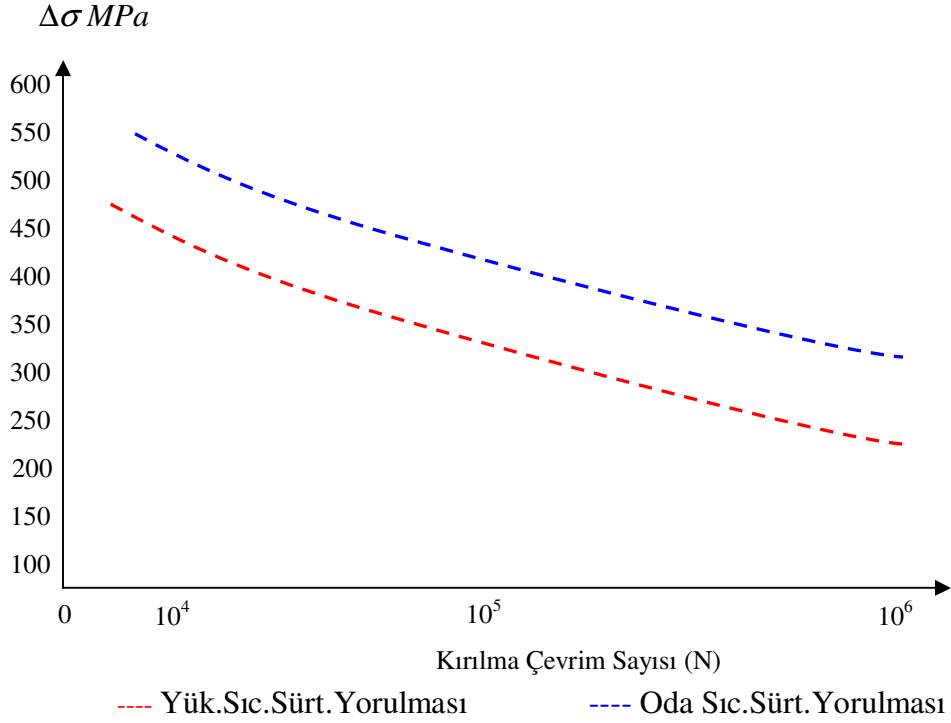
artış gözlenmiştir. Bu durum testler yapılmadan önce de bu yönde bir beklenti olduğu için testlerin de bu şekilde sonuçlar vermesi bizim için bir kanıtlanma niteliğinde olmuştur yani testlerin doğru ve etkili yapıldığının bir göstergesidir. Tablo 6.1. de testlerden elde edilen sayısal veriler gösterilmiştir. Bu verilerin diğer bir ifadesi olan grafiklere ise devam eden sayfalarda yer verilmiştir.



Şekil 6.9. Yüksek Sıcaklıklarındaki Sürtünme Yorulması Bilgileri ($\Delta\sigma$ ile N_f)

Şekil 6.10.'da ise yapılan iki testin karşılaştırmasından oluşan grafik verilmiştir. Tablo 6.1'den de anlaşılacağı üzere sürtünme yorulması iki farklı kombinasyonda yapılmıştır. Birinci kombinasyondaki testler oda sıcaklığı şartlarında yapılmış ikinci kombinasyondaki testler ise yüksek sıcaklık şartlarında gerçekleştirilmiştir. Ancak testler yapılmadan önce sıcaklığın malzeme ömrüne çok fazla etki edebileceği düşünülmesine rağmen testler sonucunda beklenen etkinin oluşmadığı gözlenmiştir. Ancak hiç bir etkisi olmadığı da söylenemez, şekilden de anlaşılacağı gibi küçük bir

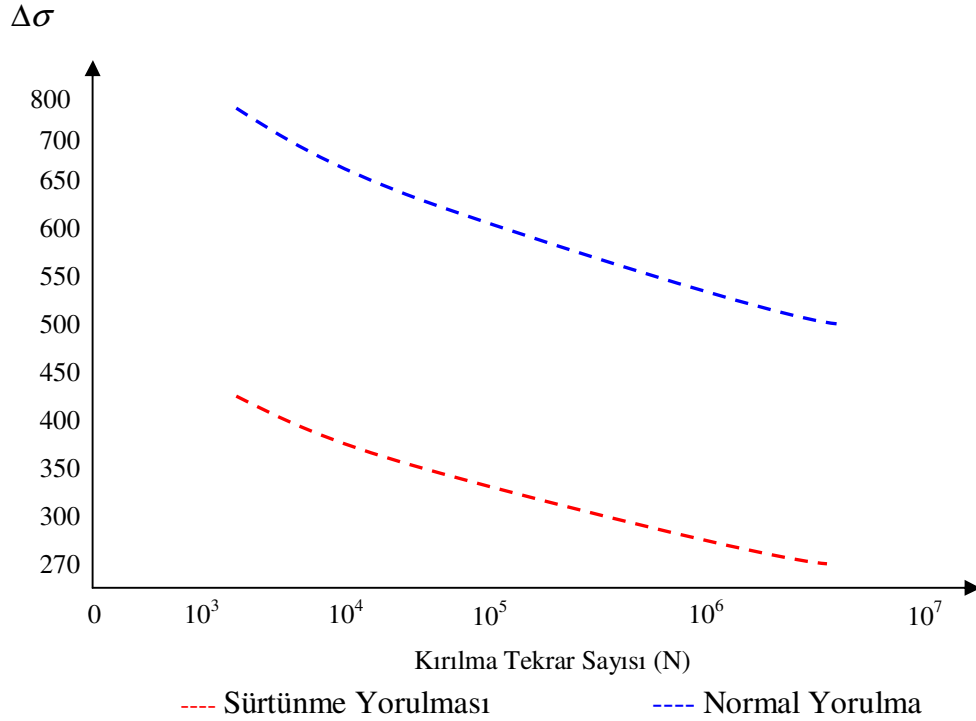
farkla da olsa yüksek sıcaklık altında çalışan malzemenin ömründe bir azalma olmuştur.



Şekil 6.10. Sürtünme Yorulmasının oda sıcaklığı ile yüksek sıcaklık değerlerinin değerlendirilmesi. ($\Delta\sigma$ ile N_f grafiği eşliğinde).

Şekil 6.11.'deki sürtünme ve normal yorulma bilgileri oda sıcaklığında yapılan testler ile birlikte verilerek karşılaştırılmıştır. Testlerden önceki öngörü sürtünmenin yorulma olayında önemli bir girdi olabileceğiydi, testler sonrasında bu öngörünün son derece haklı bir tahmin olduğu grafikten de anlaşılmaktadır. Sürtünme yorulmasında kompleks kuvvetler devreye girmiştir. Bu kuvvetler sonlu elmanlar modelinde malzeme iç yapısındaki gerilmeler belirlenirken daha ayrıntılı olarak incelenmiş ve modellenmiştir. Testlerin yapıldığı süreçte dikkat çeken bir hususla karşılaşılmıştır. Bu husus da kırılmanın meydana geldiği bölge ile ilgilidir. Kırılma bölgesi testlerin büyük bir çoğunluğunda çekme kuvveti uygulanan tarafta ve temas noktasının sonuna doğru

gerçekleşmiştir. Bu durum sonlu elemanlar yöntemi kullanıldığında da bu durumu destekler nitelikte sonuçlar vermiştir.



Şekil 6.11. Sürtünme Yorulması ve Normal Yorulmanın oda sıcaklığı şartlarındaki karşılaştırılması, ($\Delta\sigma$ ile tekrar sayısı eşliğinde).

Oda sıcaklığı şartlarında, normal yorulma ve sürtünme yorulma bilgileri karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi sürtünme etki eden malzemenin normal yükleme etki eden malzemeye göre bariz bir ömür kısıtı mevcuttur.

Yukarıdaki grafik ve şekiller incelendiğinde; Ti-6Al-4V malzemesi için yapılan deneylerde malzemeye etkisi değerlendirilen sürtünme ve sıcaklık parametrelerinden özellikle sürtünmenin malzemenin ömrüne ciddi bir etkisi olduğu, sıcaklık parametresinin ise sürtünme parametresine nazaran çok daha az bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Bu şekiller ve grafikler, sürtünme ve sıcaklığın Ti-6Al-4V

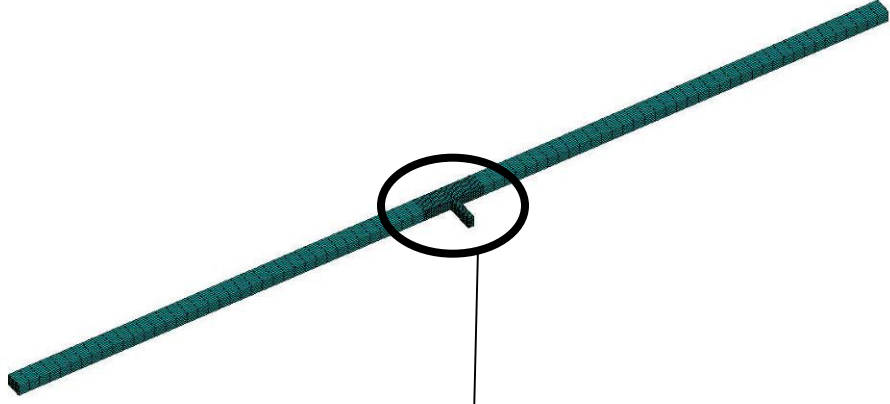
malzemesinin yükleme şartlarındaki davranışına etkisini ortaya koymak açısından önemlidir.

6.7. Sonlu Elemanlar Analizi Kullanılarak Yapılan Testlerin Doğrulanması

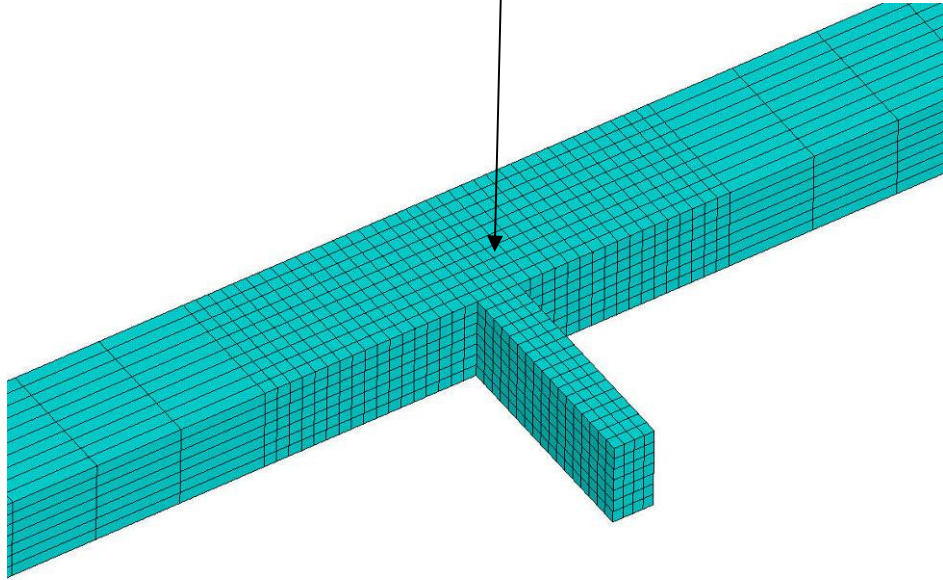
Sonlu Elemanlar Yönteminde uygulanan yöntemden kısaca bahsedilecek olursa; kullanılan geometri ve yüklemeler testte kullanılan durumlarla aynı olacak şekilde uygulanmıştır. Sürtünme katsayısı ortalama bir değer olarak 0,5 alınmıştır. Geometri ve yüklemedeki simetriden ötürü, çözüm ve modelleme süresini azaltmak amacıyla yarım model kullanılmıştır.

Yapılan inceleme sonucunda, testlerde kırılma görülen bölgede (Şekil 6.13.'de görülen sürtünme bölgesinin yük uygulanan taraftaki kenarı) en yüksek aksenal (çekme kuvveti yönünde) gerilme değeri hesaplanmıştır. Şekil 6.19.'daki düşük çekme yükü altındaki incelemede ise bu bölgede en düşük aksenal gerilme gözlenmiştir. Sürtünme uygulanmayan duruma göre daha yüksek olan bu gerilme değerlerinin N_f değerini düşüreceği değerlendirilmektedir. ANSYS Fatigue (Yorulma) modülü ile hesaplamalar yapılması için hesaplanan değerlerin gerçekçiliğinin ve elde edilen test sonuçları ile örtüşüp örtüşmediğinin değerlendirilmesi yapılmış ve uygun bulunmuştur.

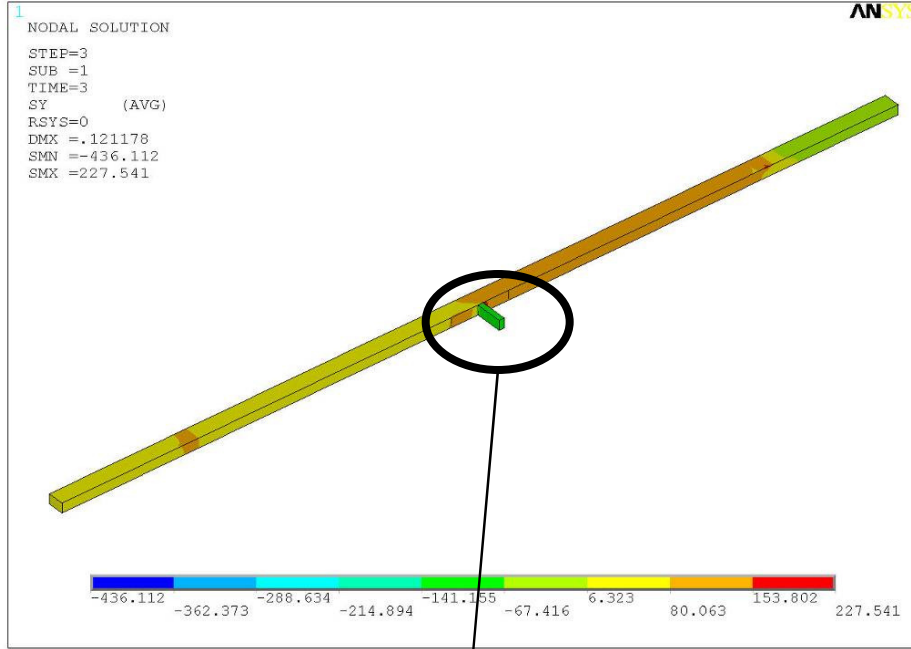
Şekil 6.13.'de ağ modeli genel yapısından da anlaşılacağı gibi sürtünme bölgesinin düğüm sayısı (ağ yapısı) yoğunlaştırılmıştır, böylece analizin sonuçlarının daha hassas olması sağlanmıştır. Diğer bölgelere etki eden yüklerin daha az kompleks olması nedeniyle ise o bölgelerin düğüm sayıları daha az tutulmuştur. Böylece analizlerin en kısa sürede bitirilmesi sağlanmıştır. Ağ modeline öncelikle numune simetrik olduğu için yarı boyutlarının çizilmesi ile başlanmış, daha sonra sürtünme pedi çizilmiş ve numune ile temas ettiği yüzey tanınmış ve sürtünme bilgileri girilmiştir. Sürtünme pedinin ince görünmesinin nedeni ise pedin sadece sürtünen kısmı kadar modelleme yapılmasıdır. Böylece incelenen ve asıl gerilmelerin yaşandığı sürtünme bölgesine sonlu elemanlar yöntemine göre, düğüm noktaları uygulanmış, ayrıca düğümler bu bölgede yoğunlaştırılmış ve daha hassas sonuçlar elde edilmiştir.



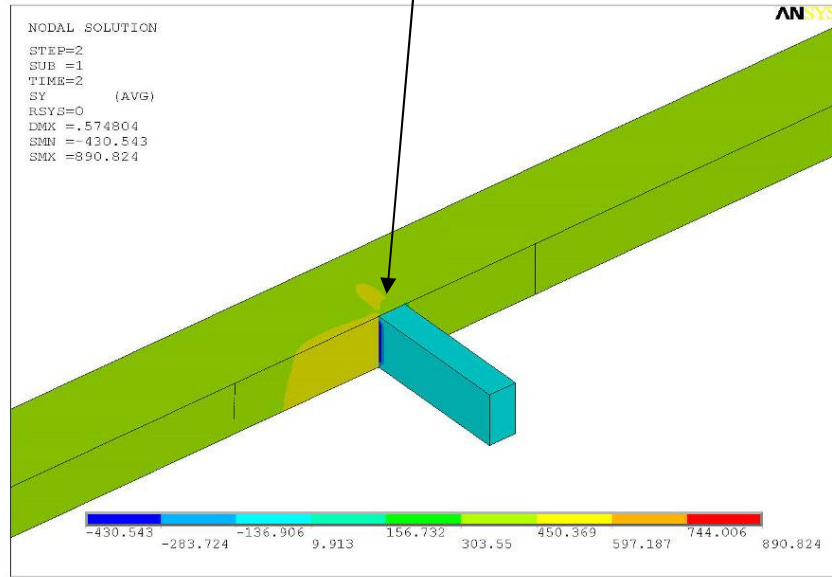
Şekil 6.12. Ağ Modeli (Genel Görünüm)



Şekil 6.13. Ağ Modeli (Sürtünme Bölgesinde Kullanılan Daha Yoğun Ağ Modeli)

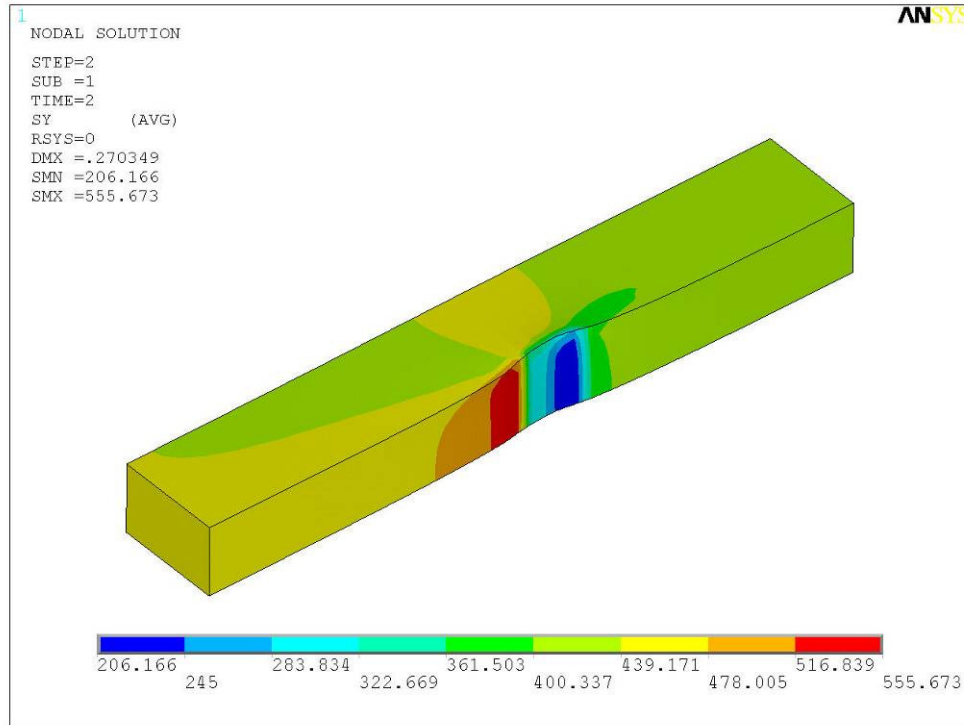


Şekil 6.14. 442 MPa Eksenel Gerilim ve Sürtünme Altında Çekme Numunesi Üzerinde Eksenel Gerilme Dağılımı-1 (MPa)

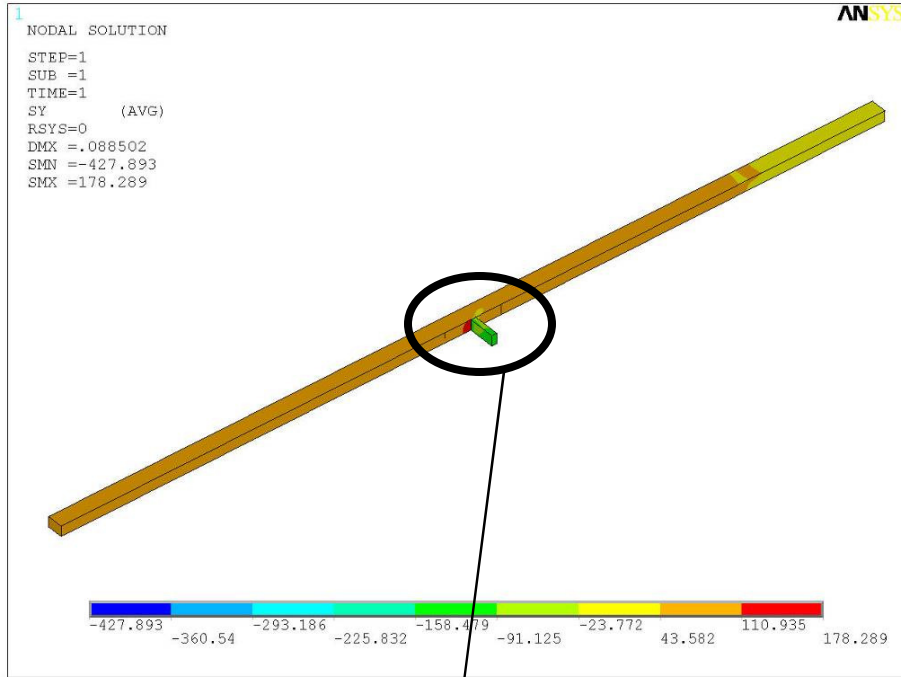


Şekil 6.15. 442 MPa Eksenel Gerilim ve Sürtünme Altında Sürtünme Bölgesi Üzerinde Eksenel Gerilme Dağılımı-2 (MPa)

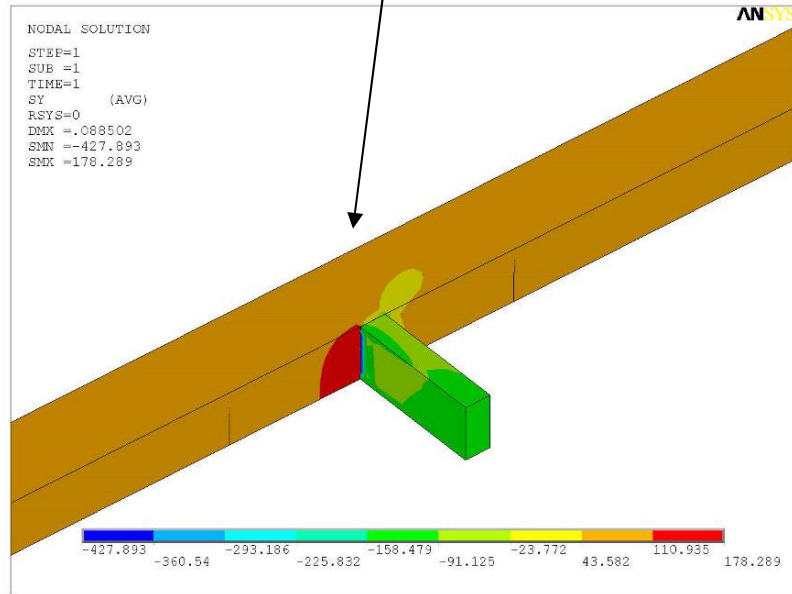
ANSYS’de modellenen düzeneğe uygulanan kuvvetler arasından σ_{\max} değeri 442 MPa ve σ_{\min} değeri ise 78 MPa seçilmiştir. Ancak uygulama diğer max ve min yüklemeler için de uygulanmış ve testlerle paralel sonuçlar elde edilmiştir. Uygulanan kuvvetler neticesinde elde edilen sonuçların ve malzemenin iç yapısına yönelik gerilim (renkli olarak) yukarıda bahsedilen iki değer monitör edilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi uygulama testlerinde gerçekleşen kırılmalarda şekilde farklı renkte (açık yeşil) görünen bölgeden kırılmalar gerçekleşmiştir. ANSYS’de modellenen ve analizi yapılan testlerin uygulamada da aynı sonuçları vermesi, sonuçların doğruluğunu göstermektedir.



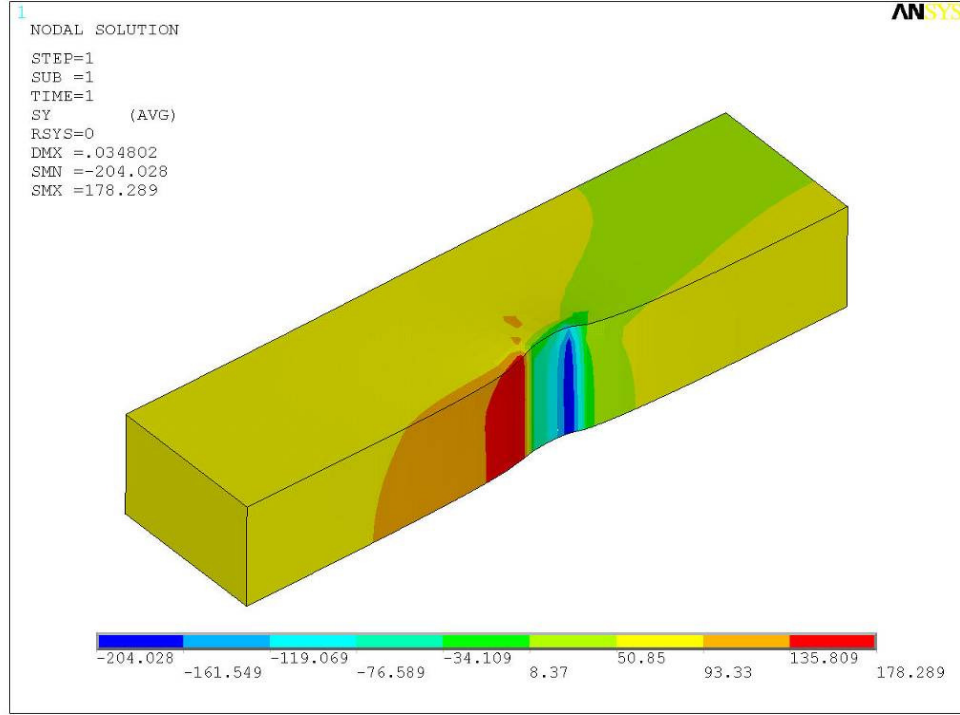
Şekil 6.16. 442 MPa Eksenel Gerilim ve Sürtünme Altında Sürtünme Bölgesi Üzerinde Eksenel Gerilme Dağılımı (MPa) (Sürtünme Pedinin Etkisinin Anlaşılır Olabilmesi için Yer Değiştirmeler 100 Kat Büyütülerek Gösterilmiştir)



Şekil 6.17. 78 MPa Eksenel Gerilim ve Sürtünme Altında Çekme Numunesi Üzerinde Eksenel Gerilme Dağılımı (MPa)



Şekil 6.18. 78 MPa Eksenel Gerilim ve Sürtünme Altında Sürtünme Bölgesi Üzerinde Eksenel Gerilme Dağılımı (MPa)



Şekil 6.19. 78 MPa Eksenel Gerilim ve Sürtünme Altında Sürtünme Bölgesi Üzerinde Eksenel Gerilme Dağılımı (MPa) (Sürtünme Pedinin Etkisinin Anlaşılır Olabilmesi için Yer Değişirmeler 100 Kat Büyütülerek Gösterilmiştir)

Sonlu Elemanlar Yönetimi kullanılarak ANSYS’de modellenen ve analizi yapılan tetstlerin, şekillerden de (6.15.-6.20.) anlaşılacağı üzere yüksek gerilmeler, sürtünme bölgesinin gerçekleştiği yerlerde meydana gelmiş olup, testlerde karşılaşılan kırılma bölgesi de Şekil 6.19.’da da görülebileceği gibi sürtünme başlangıç bölgesine çok yakın bir yerde (kırmızı renkte gösterilen) gerçekleşmiştir. Böylece testlerle, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizlerin birbirine paralel olduğu ortaya çıkmaktadır.

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

7.1. Genel Değerlendirme

Havacılıkta emniyet her zaman birinci derecede öneme sahip bir kavramdır. Uçak jet motor ve parçalarının, üretilmeleri ve hizmete verilmelerinden sonra, tüm servis ömürleri boyunca tasarım esnasında belirlenen fonksiyonel ve yapısal özelliklerini kaybetmeden yeterli ve gerekli emniyet, güvenilirlik seviyelerinde istenen şekilde çalışmaları sağlanmalıdır. Uçak jet motor parça malzemelerinde serviste çalışmaları esnasında maruz kalınan statik, dinamik yükler, yüksek sıcaklıklar korozif çevre koşulları etkisiyle malzeme hataları meydana gelir. Bu hatalardan biri de maruz kalınan dinamik yüklerin etkisiyle malzeme yüzeyinde oluşan yorulma çatlaklarıdır. Söz konusu çatlakların oluşmasında çeşitli etkenler vardır. Bu etkenler arasında sıcaklık ve sürtünme de yer alır. Ancak yorulma olayına hangi etkenin ne boyutta etki ettiği konusu araştırmaya açık bir konu olarak değerlendirilmektedir. Bu araştırmanın önemli bir bölümü yorulma olayının temeli, oluşumu, tespit edilmesi ve uygulamalı deneyler yapılarak, elde edilen veriler üzerinden bir takım sonuçlar çıkarmayı amaçlamıştır.

7.2. Testler Hakkında Değerlendirme

Jet motorunun türbininde kullanılan Alüminyum alaşımlı Titanyum (Ti-6Al-4V) Malzemesinin yüksek sıcaklık ve sürtünme şartlarındaki davranışının tespit edilmesi maksadıyla testler yapılmış ve sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiştir. Bu bağlamda testler için en uygun cihazın 22.2 kN'luk servohidrolik test cihazı olduğu belirlenmiştir. Bu cihazın en büyük özelliği: istenildiğinde cihaza spot lambalar (infrared ısıtıcı lambalar) monte edilebilmesidir. Bu spot lambalar sayesinde numuneler istenilen (250 °C) sıcaklığa kadar çıkarılabilmektedir. Böylece testler yükseltilmiş sıcaklıklarda yapılmıştır.

Testlerde uygulanan koşullardan biri de s¼rt¼nme konusudur. Numunenin gerçek Şartlar paralelinde test edilebilmesi için iki tane s¼rt¼nme pedi simetrik olarak numuneye uygulanmıştır. S¼rt¼nme pedlerinin simetrik olarak uygulanması testlerde b¼y¼k zorluklara yol açmıştır. Zorlukların en b¼y¼ę¼ pedlerin hizalanmasında yaşanmıştır. S¼rt¼nme Pedleri de aynı numunede olduğu gibi Ti-6Al-4V malzemesinden yapılmıştır. Her testin sonrasında numune ve s¼rt¼nme pedleri değiştirilmiştir. Testler sırasında ihtiyaç duyduğumuz s¼rt¼nme katsayısı için de test cihazının özelliklerinden faydalanılmış ve test cihazı bu parametreyi kendi hesaplayarak vermiştir. Bu değer testlere başlamadan ¼nce 0,45 olarak ¼l¼lm¼ř ve testlerin ilerleyen safhalarında 0,55'e kadar çıkmıştır. Bu durum s¼rt¼nme gerçekleştikçe numune ve pedlerden kopan partik¼llerin bu değeri arttırdığı sonucuna varmamızı sağlamıştır.

¼zet olarak; testler d¼rt farklı kombinasyonda gerçekleştirilmiştir. Birinci kombinasyonda Normal yorulma oda sıcaklığı Şartlarında gerçekleştirilmiştir. İkinci kombinasyonda numuneye oda sıcaklığı Şartlarında s¼rt¼nme de uygulanmıştır. Üç¼nc¼ kombinasyonda y¼ksek sıcaklıkta (250 °C) normal yorulma deneyi uygulanmıştır. D¼rd¼nc¼ kombinasyonda ise y¼ksek sıcaklıkta (250 °C) ve s¼rt¼nme Şartlarında deneyler yapılmıştır. Bu deneylerin kısa bir b¼l¼m¼ 1Hz frekansında yapılmaya başlanmış ancak çok uzun s¼rd¼ę¼nden dolayı bu frekanstan vazgeçilmiştir. Bu frekanstan vazgeçilmesinin başka bir nedeni de 10 Hz frekansta yapılan deneylerle aynı sonuca ulaşılmasıdır. Őayet frekanslar değiştirildiğinde farklı bir sonuç çıksaydı, bu farklılıklar da çalışmanın sonucu olarak yer alacaktı ve s¼rt¼nme yorulmasına veya normal yorulmaya etki eden bir parametre olarak bahsedilecekti.

Isıtma sistemini sağlayan spot lambalardan yeterli verimi almak için reflekt¼r levha ile desteklenmek suretiyle bir kombinasyon oluşturulmuştur. Bu kombinasyon sayesinde sıcaklığın artması istenen b¼lęe çok kısa zamanda gerekli sıcaklığa eriştirilmiştir.

Testler sırasında ısıl kulplar kullanılarak sıcaklıklar belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için ¼nce bu kulplar numuneye kaynak yapılarak tutturulmuş ve test başlatılmıştır. Test başladıktan sonra numune umulmadık bir biçimde çok erken tekrar sayısında kırılmıştır. Bunun sebebi olarak da numuneye yapılan kaynağın numunenin iç yapısında

bozulmalara neden olduğu değerlendirilmesinden yola çıkarak bu yöntemin bir daha uygulanmamasına karar verilmiştir. Verilen karar sonrası farklı yollar araştırılmaya başlanmış ve sürtünme pedleri üzerinden sıcaklığın ölçülmesine karar verilmiştir.

Bu aşamada testler başlatılmadan önce pedlerle numune arasında sıcaklık açısından nasıl bir ilişkinin olduğunu bulmak için elle ölçümler yapılmış ve numune ile pedlerin yaklaşık olarak aynı sıcaklıkta olduğu tespit edilmiştir. Daha ayrıntılı ölçümlerde ise numunenin sıcaklığının pedlere göre 10 °C daha sıcak olduğu sonucu çıkmıştır. Böylece sürtünme kombinasyonlu testlerde sıcaklık ölçüm sorunu böylece çözülmüştür. Ancak normal yorulma testlerinde sürtünme pedleri olmadığı için sıcaklık ölçüm sorunu normal yorulma için yeni yöntemler aramaya sevk etmiştir. Bu aşamada kaynak yapılması yerine malzemeye (numuneye) zarar vermeyecek bir yapıştırıcı üzerinde durulmuş ve başarı sağlanmıştır. Ancak yapıştırıcının da belli bir yük tekrarının ardından kopması ve yeniden yapıştırılma ihtiyacının doğması vakit kaybettirici hususlardandır.

Testler sonuçları açısından değerlendirilecek olursa; oda sıcaklığında yapılan sürtünme ve normal yorulma testleri sonucunda sürtünmenin malzemenin yorulmasıyla kırılması üzerine etkisi olduğu görülmüştür. Yani malzemenin ömrünü azaltmıştır.

Sürtünme olduğu durumda numune üzerine gelen maksimum yük miktarı normal yorulma testinde uygulanan maksimum yüke nazaran daha düşük olmasına rağmen daha erken yorulma ve kırılma olayına rastlanmıştır. Örnek verilecek olursa normal yorulma şartlarında 740 MPa bir maksimum yüklemenin olduğu test esnasında numune 546.113 yükleme tekrar sayısında kırılmıştır. Sürtünmenin olduğu bir durumda maksimum yükleme değeri olarak 415 MPa uygulamış ve numune 511.713 tekrar sayısında kırılmıştır. Bu örnekten de anlaşılacağı gibi maksimum gerilme yorulmanın yaşanması için büyük etken olmasına rağmen sürtünme olmadığı durumda numune çok yüksek maksimum gerilmelere dayanabilmektedir.

Bir başka durumda ise yüksek sıcaklık şartlarında sürtünme yorulması ve normal yorulma testleri gerçekleştirilmiş oda şartlarında yapılan testlerle arasında çok fazla bir

farkın oluşmadığı ortaya çıkmıştır. Örneğin yüksek sıcaklıklarda efektif yükleme değeri 715 MPa olan normal yorulma numunesinin kırılma tekrar sayısı 171.630 orak gerçekleşirken oda sıcaklığı şartlarında efektif yükleme değeri 765 MPa olan normal yükleme numunesinin kırılma tekrar sayısı 167813 gibi çok yakın bir değerde kalmıştır.

Testler esnasında dikkati çeken bir diğer nokta ise kırılmanın yaşandığı bölgedir. Yapılan tüm testlere bakılacak olursa kırılmanın gerçekleştiği bölgenin çekme uygulanan yönde gerçekleştiği görülmüştür. Yani çekme yönüne +x gerçekleşiyorsa kırılmanın olduğu yani sürtünmenin etkisiyle malzeme kaybının en çok olduğu bölge olarak sürtünmenin olduğu mesafenin tam ortasından +x yönü tarafına doğru olan bölümde gerçekleştiği görülmüştür.

Testlerde elde edilen genel izlenimler çerçevesinde ise; malzeme yüzeyinde oluşan yorulma çatlakları dinamik yüklerin etkisiyle ilerler ve belirli bir kritik boyuttan sonra yapının kırılmasına yol açar. Yorulma çatlakları gibi yüzeyde ya da iç kısımlarda oluşan bu malzeme hataları, malzemelerin yük altındaki davranışlarını etkileyerek yapısal bütünlüğü azaltırlar. Çünkü motorun, uçağa sağladığı tüm manevra, hareket kabiliyetleri, taşıdığı yükler ve performans değerleri tamamen motor malzemelerinin özelliklerinin bir sonucudur. Motor parça malzemeleri dolayısıyla da motor parçaları kendilerinden beklenen işlevlerini ne kadar iyi yerine getirebiliyorlarsa, motor çalışma performans değerleri de o kadar iyi olacak ve istenen emniyet ve güvenilirlik seviyeleri elde edilecektir.

Bu çalışmada yapılan deneyler ve sonlu elemanlar yöntemi ile gösterimi neticesinde yüksek sıcaklık ve sürtünme şartlarındaki uçak malzemelerinin bu şartlara oldukça dayanıklı olduğunu göstermiştir. Özellikle sıcaklığın malzemenin (Ti-6Al-4V) yorulma davranışına önemsenmeyecek kadar bir etkisi olduğu görülmüştür. Ancak sürtünmenin ise sıcaklığa nazaran daha dikkat çekici bir etkisi olduğu çıkarılacak sonuçlar arasındadır. Ayrıca yapılan testlerden malzemenin kırılma ömrü tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Sonuç olarak; uçuş emniyetinin sağlanması açısından uçak jet motorlarında meydana gelen ve komponentlerinin kırılmaları ile sonuçlanan yorulma hasarlarının bazı önlemler alınarak önlenmesi ya da azaltılması gerektiği söylenebilir.

Kullanım esnasında jet motor parçalarında karşılaşılan yorulma hasarlarının jet motor parçalarının tasarımı, üretimi esnasında alınan bazı önlemlerle engellenmesi hedeflenebilir. Kullanım sürecinde uygulanan kontrol yöntemleri de malzeme kayıplarının önüne geçmek için bir fırsattır. Bu fırsat gelişen teknoloji ile birlikte daha da aktif bir duruma dönüşmüştür.

7.3. Kullanım Aşamasında Dikkate Alınması Gerekli Hususlar

Testler aşamasında elde edilen sonuçlar ve bu çalışmanın hazırlanmasında yapılan araştırmalardan yola çıkarak Ti-6Al-4V malzemesinin ve jet motoru imalatında kullanılan diğer malzemelere yönelik olarak bakım, idame-işletme, üretim vb. konuların daha maliyet etkin olarak icra edilebilmesi maksadıyla alınabilecek önlemler genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- a. Komponentler için çalışma koşullarına uygun malzeme seçimi,
- b. Yüzey özelliklerinin geliştirilmesi,
- c. Çentik etkisinin azaltılması,
- d. Yorulma hasarının oluşumuna göre uygun bakım programlarının belirlenmesi,
- e. Serviste karşılaşılan yorulma hasarlarının incelenmesi

7.3.1. Dizayn Sürecinde Doğru Malzeme ve İmalat Yönteminin Seçilmesi

Dizayn sürecinde bir komponent için kullanılacak olan malzemenin seçimi çok önemlidir. Malzemenin özellikleri itibari ile yorulma dayanımına, sıcaklığa, sürtünmeye ve titreşime karşı mukavemetli malzemelerin seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Böylece malzemelerin değişim ihtiyacı olmadan uzun süre kullanımda

kalmaları sağlanabilecektir. Aynı zamanda maliyetleri düşürme açısından seçilen malzemelerin ağırlıkları da ayrı bir önem taşımaktadır. Malzemler ne kadar hafif olursa uçağın hareket kabiliyeti ve menzili o kadar artacak tükettiği yakıt da buna paralel olarak azalacaktır.

Malzeme seçimi maruz kalınacak koşullarla direkt olarak bağlantılıdır. Çok eksenli gerilmelere maruz kalan malzemelerde meydana gelen toplam şekil değişiminin yüzde iki ya da daha fazla ise tok malzemeler, şekilde değişiminin yüzde ikiden daha küçük olduğu uygulamalarda dayanımı yüksek malzemeler tercih edilmelidir. Malzemelerin iç yapıları da yorulma çatlaklarına dirençli olmak zorundadır. Özellikle tane yapısı itibariyle küçük taneli malzemeler yorulma çatlaklarına karşı daha dirençli olabilmektedirler. Çünkü çatlak başlangıcı için uygun ortam olan tane boşlukları küçük taneli malzemelerde bulunmamaktadır.

Çalışmada model olarak kullanılan türbin palesi (kanatçık) ele alınırsa, türbin paleleri serviste çalışması esnasında çok yüksek sıcaklıklara basınç yüklerine ve korozif çevre koşullarına maruz kalır. Bu koşullar altında türbin palelerinde ısıl yorulma ve sürtünme gibi hasar mekanizmaları oluşur. Bu türbin palesi için kullanılacak malzeme bu iki hasar mekanizmasına optimum şekilde dayanacak şekilde olmalıdır. Türbin palelerinde genellikle yüksek sıcaklık ve korozyon direnci iyi olan süperalaşım malzemeleri kullanılmaktadır. (Ti-6Al-4V malzemesi de süperalaşım sınıfına girmektedir.) Malzeme seçiminde örneğin ısıl yorulma mukavemeti çok kristalli süperalaşıma göre dört kat daha fazla olan tek kristalli süperalaşım malzemesi tercih edilmelidir. Tasarım esnasında, komponentlerin servis ömürlerinin ya da uygulanacak bakım aralıklarının belirlenmesinde, komponentlerde kullanılacak olan malzemelerin gerçek çalışma koşullarında karşılaşacakları hasar mekanizmalarına dayanımları detaylı malzeme testleri ile belirlenmelidir. Parçaların gerçek çalışma koşulları göz önüne alınarak yorulma dayanımı yüksek bir malzeme seçilmesiyle yorulma hasarının beklenenden daha önce oluşması önlenir.

7.3.2. Seçilen Malzemenin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi

Kırılan malzemeler dikkate alındığında yüzey özellikleri iyi olmayanların olanalara göre daha çabul çatlayıp kırıldıklarını görebiliyoruz. Bunun nedenlerinden biri de malzemeye etki eden gerilmelerin yoğunlaşmasına neden olabilmeleridir. Çatlakların yüzeyden başlayarak iç bölgelere doğru ilerlemesi engellenemez bunun yerine yüzeyde başlayabilecek olan çatlağın çeşitli işlemler neticesinde hiç başlamamasını veya mümkün olduğunca geç başlamasını sağlayabilmek önemlidir. Bahsedilen işlemler arasında yüzey ısıtma işlemleri ile malzeme yüzeyinin sertleştirilmesi, malzeme yüzeyinde yorulma dayanımına zararlı kalıntı gerilmelerin önlenmesi ya da uygun kalıntı gerilmelerin oluşturulması, çevre koşullarına karşı yüzey kaplama malzemelerinin kullanılması sayılabilir. Böylece yüzey özellikleri geliştirilen malzemenin, yorulma dayanımı da arttırılmış olacaktır. Tabii ısıtma işlemler malzemeler açısından her zaman metalurjik olarak risk taşır. Bu risk uygulanan ısının malzemenin tane özelliklerini değiştirebilme ihtimalidir. İçyapısı değişen malzemenin yorulma davranışının da nasıl olacağı yeni durumda kestirilemez. Ancak tane yapısı korunan malzemenin yorulma dayanımında iyileşme olacağı da bilinmelidir. Malzemenin üretimi sırasında tasarımı yapan mühendisin malzemenin kullanılacağı bölgeyi imalat mühendisine aktarması da faydalı olacaktır. Zira imalat mühendisi kullanılacak bölgeyi bilirse kalıntı gerilmelerin malzeme dayanımına etkisini dezavantajdan avantaja çevirebilir. Kalıntı gerilmeleri imalat mühendisinin yönlendirmesi ile basma gerilmesi uygulanacak tarafa yoğunlaştırılır ve malzemenin verimi artırılmış olunur. Basma yönüne yönlendirilmiş kalıntı gerilmeleri ve işlenmiş yüzey sayesinde yorulma dayanımı yükseltilmiş malzemelerin ömürleri de daha uzun olacaktır.

Kalıntı gerilmelerin faydalı hale dönüştürülmesinde çekiçleme, soğuk haddeleme ve statik ön yük uygulanması işlemleri vb. kullanılabilir. Yüksek sıcaklık, korozif çevre koşulları altında çalışan malzemelerin ömürlerinin uzatılabilmesi için kaplama yöntemi tercih edilmektedir. Ancak kaplama yapılırken malzemenin mukavemetine hasarlar verebilmektedir. Bu uygulamada yorulma dayanımını da göz önünde tutan koruyucu

madde ve işlemlerin kullanılması tercih edilerek bu olumsuz etki bir nebze ortadan kaldırılabılır.

7.3.3. İmalat Hatalarının Azaltılması

Yorulma dayanımının en büyük düşmanlarından biri de çentik, delik ve ani kesit değişimleridir. Çatlakların başlangıç noktasını oluşturan bu noktalarda gerilme yığılmalarına rastlanır, bu ise yorulma ile mücadelede istenmeyen bir durumdur. Bu sebeple imalatçıların bu gibi noktalara ayrı bir önem vermeleri gerekmektedir. Zira bu kısımlar yorulma açısından risk altındadırlar. İmalatçılar kadar tasarımda görev alan mühendislerin de bu durumu göz önüne alması ve malzeme tasarımlarında bu etkiye neden olabilecek imalat yöntemlerinden olabildiğince kaçınmalı ve tasarladıkları ürünleri mutlaka sonlu elemanlar metodu ile önceden test etmelidirler. Böylece gerilme yığılmalarını optimal düzeye indirebileceklerdir.

İmalat sürecine de yansıyan tasarım aşamasındaki titizlik ve kuvvet yığılmasını önleyecek optimal çözümler malzemenin ömrünü uzattığı gibi, malzemenin üst bileşeni olan komponente olan güveni de artıracak, gereksiz montaj işlemlerine de gerek kalmayacaktır.

Malzemeler kullanıma verildikten sonra sürekli bir takip altında olmalıdırlar. Özellikle ilk defa üretilmiş malzemelere olan güven sağlanıncaya kadar temkinli olunmalı ve üreticisi tarafından tavsiye edilmiş kontrol işlemleri zamanında uygulanmalıdır. Uzun süredir kullanımda olan malzemeler açısından bu işlem biraz daha kolaydır. Çünkü kontrol aralıkları malzeme güvenilirlik eşiğini geçtiği için daha uzun ve kolaydır. Yorulmaya bağlı çatlak oluşabilecek bölgelerin tahmini daha kolaydır. Her iki tipteki malzemeye de uygulanan kontroller kullanıcının daha güvenli olmasını ve üst ünitelerden daha uzun süre faydalanılmasını sağlar.

Tasarım mühendisleri tarafından yapılacak Laboratuvar ortamı ve simülasyon ortamındaki testlere malzemenin kullanılacağı ünitenin önemine göre emniyet katsayısı

atanır. Bu katsayı doğrultusunda malzemeye uygulanacak kontrol ve değişimlerin zamanları belirlenerek kullanıcıya bir paket halinde sunulmalıdır. Bu zamanların belirlenmesinde emniyet katsayısı önemli bir parametre olmak birlikte, emniyet katsayısının abartılı şekilde yüksek tutulması da gereksiz bir maliyet getirecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Jin, O. , Mall, S. , Sanders, J. H. , Sharma, S. K. and Hager, Fretting Fatigue Behavior of Cu-Al-Coated Ti-6Al-4V, 2007.
- [2] H. Lee a, S. Mall, S. Sathish, Evolution of residual stresses in a stress-free titanium alloy subjected to fretting fatigue, University of Dayton, Dayton, OH, ABD, 2005.
- [3] M. Jayaprakash, Yoshiharu M., Effect of contact pad rigidity on fretting fatigue behavior of NiCrMoV turbine steel, Hitachi, Ibaraki, Japonya, 2008.
- [4] Kwai S. Chan, Michael P. Enright, Jonathan P. Moody, Patrick J. Golden, Residual stress profiles for mitigating fretting fatigue in gas turbine engine disks, Southwest Research Institute, San Antonio, ABD, 2008.
- [5] P.J. Golden, B.B. Bartha, A.F. Grandt, T. Nicholas, Measurement of the fatigue crack propagation threshold of fretting induced cracks in Ti-6Al-4V, US Air Force Research Laboratory, Wright-Patterson AFB, OH, ABD, 2003.
- [6] Suresh S., Fatigue of materials, Cambridge University Press, London, UK, 20-205, 1991.
- [7] Dieter G. E., Mechanical metallurgy, McGraw-Hill Book Company, London, UK, 40-168, 1988.
- [8] Antolovič S. D. ve Saxena A., Fatigue failures, Metals Handbook; 9th edition Volume 11: Failure analysis and prevention, (Ed: ASM Handbook Committee), American Society for Metals, Ohio, USA, 102-135, 1986.
- [9] LAIRD, C, Fatigue failures, Metals Handbook Desk Edition, (Ed: Boyer, H.E., Gali, T.L.), American Society for Metals, Ohio, USA ,13-32, 1985.

- [10] WULPI, D.J., Understanding how components fail, American Society for Metals, Ohio, USA, 1985.
- [11] KAYALI, E. S., ENSARİ, C. ve DİKEÇ, F., Metalik malzemelerin mekanik deneyleri, Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul, Türkiye, 35-130, 1984.
- [12] MATTHEWS, F. L. ve RAWLINGS, R. D., Composite materials: Engineering and science, Chapman and Hall, London, UK, 80-147 1994.
- [13] F110-GE-100/100B/100C Turbofan motoruna ait Maintenance Instructions Intermediate Level High Cycle Fatigue Response to Surface Grinding, Teknik Emir Kitabı, GE, 2007.
- [14] F110-GE-100/100B/100C Turbofan motoruna ait Technical Manual Maintenance Instructions Depot Level General Information, Teknik Emir Kitabı, GE, 2001.
- [15] F110-GE-100/100B/100C Turbofan motoruna ait Technical Manual Maintenance Instructions Depot Level Support Equipment, Teknik Emir Kitabı, GE, 2001 (2008 yılındaki değişiklikleri içerir).
- [16] F110-GE-100/100B/100C Turbofan motoruna ait Technical Manual Maintenance Instructions Depot Level Disassembly, Teknik Emir Kitabı, GE, 2001 (2010 yılındaki değişiklikleri içerir).
- [17] F110-GE-100/100B/100C Turbofan motoruna ait Technical Manual Maintenance Instructions Depot Level Cleaning and Stripping, Teknik Emir Kitabı, GE, 2001 (2009 yılındaki değişiklikleri içerir).
- [18] F110-GE-100/100B/100C Turbofan motoruna ait Technical Manual Maintenance Instructions Depot Level Inspection, Teknik Emir Kitabı, GE, 2001 (2010 yılındaki değişiklikleri içerir).

- [19] F110-GE-100/100B/100C Turbofan motoruna ait Technical Manual Maintenance Instructions Depot Level Repair, Teknik Emir Kitabı, GE, 2001 (2008 yılındaki değişiklikleri içerir).
- [20] F110-GE-100/100B/100C Turbofan motoruna ait Technical Manual Maintenance Instructions Depot Level Assembly, Teknik Emir Kitabı, GE, 2001 (2009 yılındaki değişiklikleri içerir).
- [21] F110-GE-100/100B/100C Turbofan motoruna ait Technical Manual Maintenance Instructions Depot Level Engine Test, Teknik Emir Kitabı, GE, 2001 (2010 yılındaki değişiklikleri içerir).
- [22] F110-GE-100/100B/100C Turbofan motoruna ait Technical Manual Maintenance Instructions Depot Level Troubleshooting And Conditional Maintenance, Teknik Emir Kitabı, GE, 2001 (2008 yılındaki değişiklikleri içerir).
- [23] F110-GE-100/100B/100C Turbofan motoruna ait Technical Manual Maintenance Instructions Depot Level Accessories, Teknik Emir Kitabı, GE, 2001 (2009 yılındaki değişiklikleri içerir).
- [24] BENT, R. D. ve McKINLEY, J. L., Aircraft powerplants, McGraw-Hill Book Co., New York, USA, 1985.
- [25] TETİK, D., AY, N., Hava taşıtlarında yorulma, Kayseri II. Havacılık Sempozyumu Bildiriler Kitabı (Ed: ATLI, V), Kayseri, Türkiye 99-101, 1998.
- [26] ONARAN, K., Malzeme bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, Türkiye, 1993.
- [27] BROEK, D., The practical use of fracture mechanics, Kluwer Academic Publishers, Netherland (1989).

- [28] KAYRAK, M., Uçak bakımında tahribatsız kontrol yöntemleri, Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksek Okulu Yayınları, Eskişehir,38-170, 2001.