T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UÇAK GÖVDE VE MOTOR BAKIMI ANABİLİM DALI

HAVACILIKTA KULLANILAN ULTRASONİK HASARSIZ KONTROL YÖNTEMİ: PHASED ARRAY TESTİ UYGULAMASI

Hazırlayan
Cankara AKBULUT

Danışman
Doç. Dr. Veysel ERTURUN

Yüksek Lisans Tezi

Şubat 2024
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UÇAK GÖVDE VE MOTOR BAKIMI ANABİLİM DALI

HAVACILIKTA KULLANILAN ULTRASONİK HASARSIZ KONTROL YÖNTEMİ: PHASED ARRAY TESTİ UYGULAMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Cankara AKBULUT

Danışman
Doç. Dr. Veysel ERTURUN

Şubat 2024
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

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

Cankara AKBULUT

İmza

“Havacılıkta Kullanılan Ultrasonik Hasarsız Kontrol Yöntemi: Phased array testi uygulaması ” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan	**Danışman**
Cankara AKBULUT	Doç. Dr. Veysel ERTURUN
İmza	İmza

Uçak Gövde ve Motor Bakımı ABD Başkanı

Doç. Dr. Veysel ERTURUN

İmza

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince bana her türlü yardımı ve fedakârlığı sağlayan, bilgi birikiminden yararlandığım Sayın hocam Doç. Dr. Veysel ERTURUN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bana her türlü yardımı sağlayan ve fikir alışverişi yapabildiğim Sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Haşim KAFALI'ya, destekleriyle akademik çalışmalara karşı motive olmamı sağlayan çalışma arkadaşım Erdem TUNCA'ya ve tez çalışmaları sırasında yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Muhammed Furkan AKIN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmaları sırasında NDT atölyesini kullanmamı sağlayarak yardımlarını esirgemeyen MyTechnic uçak bakım şirketi NDT mühendisleri Taylan DEMİR ve Kıvanç AKDOĞU'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Bana olan inançları ve maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan beni bugünlere getiren aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışması, 6 Şubat 2023 tarihinde yaşanan depremde hayatını kaybeden ağabeyim, yengem, yeğenlerim ve tüm depremzedelerin anısına ithaf edilmiştir.

Cankara AKBULUT

Şubat 2024, KAYSERİ

HAVACILIKTA KULLANILAN ULTRASONİK HASARSIZ KONTROL YÖNTEMİ: PHASED ARRAY TESTİ UYGULAMASI

Cankara AKBULUT

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Şubat 2024
Danışman: Doç. Dr. Veysel ERTURUN

ÖZET

Tahribatsız muayene, bir nesneye zarar vermeden o nesne hakkında bir şeyler öğrenmek için özel ekipman ve yöntemlerin kullanılması olarak açıklanabilir. Ultrasonik inceleme, tahribatsız muayenede en yaygın olarak uygulanan kusur tespit yöntemlerinden biridir. Ultrasonik test ; yüzey, yüzey altı ve iç kusurları tespit etmek ve değerlendirmek için kullanılan en güçlü tahribatsız muayene tekniklerinden biridir. Ultrasonik faz dizi ultrasonik yöntemi kusurları hassas olarak tespit eder. Ultrasonik faz dizi; kalınlık ölçümü, kaynak muayene ve yorulma çatlağı gibi kusurların tespitinde başarı göstermiştir. Tahribatsız muayene uygulamaları için ultrasonik faz dizilerin kullanımı son yıllarda hızla büyümüştür. Uçak yapılarında yorulma çatlağı ve korozyon gibi kusurlar oluşmaktadır. Bu kusurların uçak yapısında hasar oluşturmadan önce tespit edilebilmesi son derece önemlidir. Bu çalışmada tahribatsız muayene el kitapçıklarına uygun olarak kanat dış kaplaması, spoiler bağlantı parçası ve ana iniş takımı bağlantı parçasında incelemeler yapılmıştır. Uçak yapılarına uygulanan incelemelerde, geleneksel ultrasonik muayene yöntemi ve faz dizi ultrasonik yöntem kullanılmıştır. Uçak yapılarının incelemesinde ultrasonik a-tarama,c-tarama ve s-tarama kullanılmıştır. İncelemeler sonucunda elde edilen ultrasonik görünümler değerlendirilmiştir. Değerlendirmelerden elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Uçak yapılarındaki kusurların tespitinde kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinde gözlemlenen bazı sorunların giderilmesine yönelik çalışmaların yapılması önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tahribatsız muayene, Faz dizi ultrasonik muayene yöntemi, Uçak yapıları, Kusur tespiti, Havacılık

ULTRASONIC NON-DESTRUCTIVE TESTING METHOD USED IN AVIATION: PHASED ARRAY TEST APPLICATION

Cankara AKBULUT

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master Thesis, January 2024
Supervisor: Assoc. Prof. Veysel ERTURUN

ABSTRACT

Non-destructive testing can be explained as the use of special equipment and methods to learn something about an object without damaging it. Ultrasonic inspection is one of the most commonly applied flaw detection methods in non-destructive testing. Ultrasonic testing is one of the most powerful non-destructive testing techniques used to detect and evaluate surface, subsurface and internal defects. Ultrasonic phased array ultrasonic method detects defects precisely. Ultrasonic phased array has shown success in detection of defects such as thickness measurement, weld inspection and fatigue cracks. The use of ultrasonic phased arrays for non-destructive testing applications has grown rapidly in recent years. Defects such as fatigue cracks and corrosion occur in aircraft structures. It is extremely important to detect these defects before they cause damage to the aircraft structure. In this study, inspections were carried out on the wing skin, spoiler fitting and main landing gear attachment lug in accordance with the non-destructive testing manuals. In the inspections applied to aircraft structures, traditional ultrasonic inspection method and phased array ultrasonic method were used. Ultrasonic a-scan, c-scan and s-scan were used in the inspections of aircraft structures. The ultrasonic images obtained as a result of the inspections were evaluated. The results obtained from the evaluations were interpreted. It has been suggested that studies should be carried out to eliminate some problems observed in non-destructive testing methods used to detect defects in aircraft structures.

Keywords: Non-destructive testing, Phased array ultrasonic inspection method, Aircraft structures, Flaw detection, Aviation

İÇİNDEKİLER

HAVACILIKTA KULLANILAN ULTRASONİK HASARSIZ KONTROL YÖNTEMİ: PHASED ARRAY TESTİ UYGULAMASI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ..... **ii**

YÖNERGEYE UYGUNLUK ..... **iii**

KABUL VE ONAY ..... **iv**

TEŞEKKÜR ..... **v**

ÖZET ..... **vi**

ABSTRACT ..... **vii**

İÇİNDEKİLER ..... **viii**

KISALTMALAR ..... **xiii**

TABLOLAR LİSTESİ ..... **xv**

ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **xvi**

GİRİŞ **1**

1. BÖLÜM

TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ

1.1. Sıvı Penetrant Testi **5**

1.2. Manyetik Parçacık Testi **7**

1.3. Akustik Emisyon Testi **9**

1.4. Termografi **10**

1.5. Radyografi Testi **11**

1.6. Gözle Muayene **12**

1.7. Girdap Akımı (Eddy Current) Testi **13**

1.8. Ultrasonik Test 14

1.8.1. Ultrason (Ses Üstü Dalga) 20

1.8.2. Dalga yayılımı 21

1.8.2.1. Boyuna dalgalar 21

1.8.2.2. Enine dalga 22

1.8.2.3.Yüzey dalgaları 22

1.8.3. Ses Dalgalarının Temel Özellikleri 22

1.8.4. Ultrasonik Dönüştürücüler 26

1.8.5. Ultrasonik Dönüştürücünün Temel Özellikleri 27

1.8.6. Ultrasonik Bağlayıcılar 29

2.BÖLÜM

FAZ DİZİ ULTRASONİK TEST

2.1. Faz Dizi Sistemi 33

2.2. Ultrasonik Fazlama 34

2.3. Faz Dizi Probları 35

2.4. Faz Dizi Takozları 40

2.5. Tarama Modelleri 40

2.6. Ultrasonik Görünümler 42

3. BÖLÜM

UÇAK YAPILARI VE YAPI KUSURLARI

3.1. Uçak Yapıları 45

3.1.1. Gövde 45

3.1.2. Kanat 49

3.1.3. Kuyruk Takımı 52

3.1.4. Uçuş Kontrol Yüzeyleri 54

3.1.5. İniş Takımı 58

3.2. Yapı Kusurları 61

3.2.1. Korozyon 61

3.2.1.1. Genel Yüzey Korozyonu 63

3.2.1.2. Çukurcuk Korozyonu 64

3.2.1.3. Yarık Korozyonu 64

3.2.1.4. Taneler Arası Korozyon 65

3.2.1.5. Aşındırma Korozyonu 65

3.2.1.6. Gerilme-Korozyon Çatlakları 66

3.2.2. Yorulma 69

4. BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

4.1. Literatür Taraması 73

5. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. İnceleme Yapılan Yapılar 87

5.2. İncelemelerde Kullanılan Cihazlar 91

5.2.1. Faz Dizi Ultrasonik Muayene Cihazı 91

5.2.2. Geleneksel Ultrasonik Muayene Cihazı 93

5.2.3. Ultrasonik Tahribatsız Muayene Probları 95

5.2.4. Kalibrasyon Blokları 98

5.2.4.1. I.I.W. Kalibrasyon Bloğu (V1 Blok) 99

5.2.4.2. Minyatür Açı-Işın Bloğu (V2 Blok) 99

5.2.4.3. Kalınlık Blokları 100

5.3. İncelenen Yapılara Uygulanan Tahribatsız Muayene ve Prosedürleri.....101

5.3.1. Firar Kenarı ile Arka Spar ve Arka Ara Spar Ön Bağlantı Sırası Arasındaki Üst Kanat Dış Kaplamasının Muayenesi.....101

5.3.1.1. İnceleme Hazırlığı 103

5.3.1.2. Cihaz Ayarı.....105

5.3.1.3. İnceleme 107

5.3.2. Kanat 3 ve 4 Numaralı Spoiler Merkez Menteşe Bağlantı Elemanı Yatak Bloğu Muayenesi.....108

5.3.2.1. İnceleme Hazırlığı 108

5.3.2.2. Cihaz Kalibrasyonu 109

5.3.2.3. İnceleme Prosedürü 109

5.3.3. Ana İniş Takımının Rib5 İleri Bağlantı Kulakçığı Muayenesi.....110

5.3.3.1. İnceleme Hazırlığı 111

5.3.3.2. Cihaz Kalibrasyonu 111

5.3.3.3. İnceleme Prosedürü 114

6. BÖLÜM

BULGULAR

6.1. Firar Kenarı ile Arka Spar ve Arka Ara Spar Ön Bağlantı Sırası Arasındaki Üst Kanat Dış Kaplamasının Muayene Görüntüleri 115

6.2. Kanat 3 ve 4 Numaralı Spoiler Merkez Menteşe Bağlantı Elemanı Yatak Bloğu Muayenesi 127

6.3. Ana İniş Takımının Rib5 İleri Bağlantı Kulakçığı Muayenesi 128

7. BÖLÜM

SONUÇ ve ÖNERİLER

7.1.Sonuçlar 132

7.2. Öneriler 135

KAYNAKÇA 137

ÖZGEÇMİŞ 143

KISALTMALAR

NDT : Tahribatsız muayene

UT : Ultrasonik test

PAUT : Faz dizi ultrasonik test

CFRP : Karbon fiber takviyeli polimer

ET : Girdap akımı testi

SHM : Yapısal sağlık izleme

XCT : X-ray bilgisayarlı tomografi

NDE : Tahribatsız değerlendirme

RTR : Gerçek zamanlı radyografi

AE : Akustik emisyon

PE : Darbe yankı

TTU : İletim yoluyla ultrason

MHz : MegaHertz

KHz : KiloHertz

F : Frekans (Hz)

T : Periyot

λ : Dalga boyu (metre)

v : Dalga hızı (metre/saniye)

dB : Desibel

2D : İki boyutlu

θ : Teta

ρ : Rho

U_{ses}	: Ultrasonik yol
°	: Derece
APU	: Yardımcı güç ünitesi
FR	: Frame
THS	: Ayarlanabilir yatay stabilize
GFRP	: Cam fiber takviyeli polimer
ELAC	: Elevatör ve aileron bilgisayarı
SEC	: Spoiler ve elevatör bilgisayarı
Cl-	: Klorür
TOFD	: Time of flight diffraction
3D	: Üç boyut
Al	: Alüminyum
PZT	: Piezoelektrik dönüştürücü
kN	: Kilonewton
NDI	: Tahribatsız inceleme
IIW	: Uluslararası Kaynak Enstitüsü
ISO	: Uluslararası Standart Organizasyonu
SRM	: Yapısal tamir el kitapçığı
NTM	: Tahribatsız muayene el kitapçığı
CRT	: Cathode ray tube
FSH	: Tam ekran yüksekliği (full screen height)
AMM	: Hava aracı bakım el kitapçığı

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Deniz suyunda seçilen metaller ve kompozitler için standart elektrot potansiyeli sıralamaları 63
Tablo 5.1. OmniScan MX taşınabilir NDI cihazı özellikleri. 92
Tablo 5.2. OmniScan MX taşınabilir NDI cihazı faz dizi modülü özellikleri. 93
Tablo 5.3. EPOCH 650 taşınabilir NDI cihazı özellikleri. 94
Tablo 5.4. OmniScan MX faz dizi modülü ilk kurulum ayarları. 105
Tablo 5.5. Sinyal Kodlayıcı Ayarları. 106
Tablo 5.6. Cihaz Kontrol Ayarları. 111

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Yüzey incelemesi için hasarsız kontrol yöntemleri 4
Şekil 1.2. Yüzey altı muayenesi için hasarsız kontrol yöntemleri 5
Şekil 1.3. Manyetik Alan Kutupları 8
Şekil 1.4. Elektromanyetik boyunduruk 9
Şekil 1.5. Girdap akımı testi prensibinin kavram diyagramı 14
Şekil 1.6. Ultrasonik test cihazlarının tarihsel değişimi 16
Şekil 1.7. Tipik ultrasonik konfigürasyonlar; (a) iletim yoluyla ultrason, (b) darbe yankı, (c) gönderme-algılama ve (d) yönlendirilmiş (kılavuzlu) dalgalar 18
Şekil 1.8. Ses frekans aralıkları 20
Şekil 1.9. Boyuna Dalga 21
Şekil 1.10. Enine Dalga 22
Şekil 1.11. Işın yayılması 24
Şekil 1.12. Ses dalgası kırılması ve mod dönüşümü 25
Şekil 1.13. Dalga modlarının bağıl genliği 26
Şekil 1.14. Bir dönüştürücünün ses alanı 28
Şekil 2.1 Karmaşık bir geometri bileşeni üzerinde faz dizi ultrasonik teknolojisinin uygulama örneği 33
Şekil 2.2. Faz dizi sisteminin temel bileşenleri ve aralarındaki bağlantı 34
Şekil 2.3. Konvansiyonel (geleneksel) prob ile grup yayınım (faz dizi) probu 36
Şekil 2.4. Farklı tipte faz dizili problar 36
Şekil 2.5. Geleneksel ultrasonik muayene probu kesiti 37
Şekil 2.6. Faz dizi probu kesiti 37
Şekil 2.7. Faz dizi probunun boyutsal parametreleri 39
Şekil 2.8. Faz dizi prob türleri; (a) eşit fresnel yüzeylere sahip dairesel faz dizili problar, (b) 1-D doğrusal faz dizi probu, (c) 2-D matris faz dizi probu, (d) rho-teta (ρ-θ) (parçalara ayrılmış dairesel) faz dizi probu, (e) 1.5-D matris faz dizi probu, (f) çiftli doğrusal faz dizi probu, (g) çiftli 1.5-D faz dizi probu, (h) içbükey faz dizi probu, (j**)** dışbükey faz dizi probu 39
Şekil 2.9. Faz dizi prob takozları 40

Şekil 2.10. Ultrasonik tarama modelleri; (a) çift yönlü ve tek yönlü tarama, (b) prob karakterizasyonu için doğrusal tarama modeli, (c) eğik (açısal) çift yönlü tarama, (d) silindirik parçalar üzerinde helisel yüzey taraması 41
Şekil 2.11. Ultrasonik görünümler (B-taraması, C-taraması ve D-taraması)..... 42
Şekil 2.12. A-tarama gösterimi 42
Şekil 2.13. B-tarama gösterimleri; (a) reflektörü gösteren, bileşenin düzeltilmemiş B-taraması (yandan görünüm), (b) kırılan açı için düzeltilmiş B-tarama görünümü..... 43
Şekil 2.14. Diğer ultrasonik tarama gösterimleri; (a) üstten (C-tarama) görünüm, (b) arkadan (D) görünüm, (c) S-tarama 44
Şekil 3.1. Yarı monokok gövde yapısı 47
Şekil 3.2. Gövde komponent yerleşimleri 48
Şekil 3.3. Kanat rib ve spar yerleşimi 51
Şekil 3.4. Kanat yapısı 52
Şekil 3.5. Kuyruk Takımı 54
Şekil 3.6. Airbus A320 uçağı uçuş kontrol yüzeyleri 57
Şekil 3.7. Ana iniş takımı bileşenleri 59
Şekil 3.8. İniş takımı komponentleri 60
Şekil 3.9. Korozyon türleri; (a) genel yüzey korozyonu, (b) çukurcuk korozyonu, (c) soyulma korozyonu, (d) gerilme korozyon çatlağı 67
Şekil 3.10. Aloha havayolları 243 sefer sayılı uçuşunda uçak gövdesinde yaşanan korozyon yorulması sonucu oluşan hasar 68
Şekil 5.1. İnceleme yapılan ‘A’ alanı 88
Şekil 5.2. İnceleme yapılan ‘B’ alanı 88
Şekil 5.3. İnceleme yapılan ‘C’ alanı 89
Şekil 5.4. İnceleme yapılan spoiler parçası; (a) incelenen yapının teknik çizimi, (b) incelenen yapının kanattaki görüntüsü 90
Şekil 5.5. İnceleme yapılan iniş takımı ile rib5 bağlantı parçası 90
Şekil 5.6. OmniScan MX taşınabilir NDI ölçüm cihazı 91
Şekil 5.7. EPOCH 650 taşınabilir NDI ölçüm cihazı 94
Şekil 5.8. V201-RM gecikme hattı kalınlık ölçüm probu 96
Şekil 5.9. RollerFORM faz dizi tekerlekli probu; (a) prob boyutları, (b) RollerFORM prob 97

Şekil 5.10. Kullanulan açılı problar; (a) SA-455T ultrasonik dönüştürücü, (b) SC2822 ultrasonik dönüştürücü 97
Şekil 5.11. 10L32-A1 ultrasonik dönüştürücü 98
Şekil 5.12. V1 kalibrasyon bloğu 99
Şekil 5.13. V2 kalibrasyon bloğu 100
Şekil 5.14. Kademeli kalınlık kalibrasyon bloğu 100
Şekil 5.15. EPOCH 650 taşınabilir NDI ölçüm cihazında alınan sinyal değeri 101
Şekil 5.16. Referans bloğu ve alınan sinyaller; (a) referans bloğu, (b) ilk alınan sinyal, (c) ikinci alınan sinyal (d) üçüncü alınan sinyal 102
Şekil 5.17. İnceleme 'A' alanı tarama yolları 103
Şekil 5.18. İnceleme 'B' alanı tarama yolları 104
Şekil 5.19. İnceleme 'C' alanı tarama yolları 105
Şekil 5.20. Ekran görüntüsü geçit konumları 107
Şekil 5.21. OmniScan MX taşınabilir NDI ölçüm cihazında alınan sinyal değeri 107
Şekil 5.22. Referans blok üzerinde ekipmanın ayarlanması 109
Şekil 5.23. İnceleme alanında prob hareketi 110
Şekil 5.24. Spoiler merkez menteşe bağlantı elemanı yatak bloğu; (a) yatak bloğu, (b) yatak bloğunun prob tertibatıyla incelenmesi 110
Şekil 5.25. EPOCH 650 cihazı ekranında okunan sinyal değeri 112
Şekil 5.26. OmniScan MX cihaz kalibrasyonu 113
Şekil 5.27. +6 dB OmniScan MX cihaz kalibrasyonu 113
Şekil 5.28. İncelenen alan 114
Şekil 6.1. Ultrasonik tarama görünümlerinin eksenleri 115
Şekil 6.2. '1' numaralı ultrasonik muayene görünümlerinin yerleşimi 116
Şekil 6.3. '2' numaralı ultrasonik muayene görünümlerinin yerleşimi 117
Şekil 6.4. '3' numaralı ultrasonik muayene görünümlerinin yerleşimi 119
Şekil 6.5. '4' numaralı ultrasonik muayene görünümlerinin yerleşimi 120
Şekil 6.6. '5' numaralı ultrasonik muayene görünümlerinin yerleşimi 121
Şekil 6.7. '6' numaralı ultrasonik muayene görünümlerinin yerleşimi 123
Şekil 6.8. '7' numaralı ultrasonik muayene görünümlerinin yerleşimi 124
Şekil 6.9. '8' numaralı ultrasonik muayene görünümlerinin yerleşimi 126
Şekil 6.10. Ultrasonik tarama görünümünün eksenleri 127
Şekil 6.11. Spoiler menteşe bağlantı elemanı yatak bloğu muayene görünümü 128

Şekil 6.12. Ultrasonik tarama görünümlerinin eksenleri 129
Şekil 6.13. Ana iniş takımının rib5 ileri bağlantı kulakçığı muayene görünümü 130
Şekil 6.14. İncelenen bölgedeki yapı kusurunun konumu 131

GİRİŞ

Ultrasonik yöntem, tahribatsız muayenede (NDT) en yaygın olarak uygulanan tespit yöntemlerinden biridir. Lazer ultrason, geniş bir frekans bandında temassız ve yüksek duyarlı olma avantajlarından dolayı ultrasonik test alanında önemli bir bileşen haline gelmiştir [1].

Ultrasonik test (UT), malzeme karakterizasyonu ve kusur muayenesi için en önemli NDT tekniklerinden biridir. Ultrasonik dalgalar malzemeler arasında çok verimli bir şekilde yayılabileceğinden ve insanlara zararlı olmadığından, yapılardaki iç kusurları ölçmek için yaygın olarak uygulanır [2].

Termografi ve ultrasonik testler, farklı tipteki hasarların tespit edilmesini sağlayan en uygun standartlaştırılmış NDT teknikleridir. Son yıllarda, birçok yazar, kompozit yapılarda NDT yöntemlerini ve işlem kalite kontrolü ve hasar değerlendirmesi kapasitelerini karşılaştırmıştır. Hepsi, termografinin yüzeyin yakınında bulunan kusurlarla sınırlı olduğu, ultrasonik muayene yönteminin ise kompozit malzemelerde kusur tespiti için yaygın olarak kullanılan bir teknik olduğu konusunda hemfikirdir [3].

Ultrasonik test; yüksek nüfuz gücü, hassasiyeti, boyut ve şekilleri tahmin etme yeteneği, hızlı algılama sonuçları ve operatörler için tehlike olmaması nedeniyle önem arz etmektedir. Faz dizi ultrasonik test; son yıllarda tıbbi, nükleer güç ve malzeme değerlendirme dahil olmak üzere çeşitli tahribatsız uygulamalar için kullanılmıştır çünkü ultrasonik ışın, ultrasonik probları yeniden yapılandırmaya gerek kalmadan yönlendirilebilir ve odaklanabilir [4].

UT' nin altında yatan temel ilke, yüksek frekanslı ultrasonik dalgaların bir malzemeye nüfuz edebilmesidir. Ultrasonik dalgaların farklı maddelerden oluşan bir sınır tabakasından yansıtılması özelliği kullanılarak ultrasonik dalga hedefe yayılır ve bir kusur varsa yansıtılır. Tek bir piezoelektrik elemanın prob ışını tek bir yön boyunca yayılırken, birden fazla prob içeren faz dizi ultrasonik test (PAUT) probu ışınların çeşitli açılarda ışıması ve toplanması nedeniyle birden çok yönden çatlakları tespit edebilir [5].

Ultrasonik faz dizi tekniği, kompakt dönüştürücünün özelliklerine ve dizi elemanlarının düzgün zaman gecikmeli sinyalleri nedeniyle yüksek denetim hassasiyetine sahiptir. Bu nedenle türbin rotorları, köşe şekilli bileşenler ve nükleer santral bileşenleri dahil olmak

üzere karmaşık yapıların denetimi için diğer tahribatsız muayene yöntemlerine göre bazı avantajlara sahiptir [6].

Faz dizi ultrasonik muayene yöntemi, muayene açısını değiştirme ve/veya ışının ilgili bir noktaya odaklanmasında sunduğu esneklik nedeniyle yapısal bileşenlerdeki çatlak benzeri kusurların tespiti ve görüntülenmesi için hızlı bir tahribatsız değerlendirme tekniği olarak ortaya çıkmıştır [7].

Ultrasonik faz dizi; kusurların tespiti, kalınlık ölçümü ve kaynak muayenesinde başarı göstermiştir. Elektrikli cihaz tarafından üretilen yüksek frekanslı ultrasonik enerji, kuplaj yoluyla malzemeye nüfuz eder. Dalga iletim yolunda bir kusur olduğunda, ultrasonik dalga yansıtılacak veya alıcı elektrik dönüştürücüsüne iletilecektir [8].

Tahribatsız muayene uygulamaları için ultrasonik dizilerin kullanımı son yıllarda hızla büyümüştür. Diziler, hassasiyet ve denetim performansı açısından tek elemanlı dönüştürücülere göre önemli avantajlara sahiptir. Dizi teknolojisinin benimsenmesi; güç üretimi, havacılık, petrol ve gaz sektörü ve otomotiv dahil olmak üzere çok çeşitli endüstriyel sektörlerde olmuştur [9].

Hava araçlarının birincil yük taşıyan yapılarında karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) tabakanın uygulanması, yüksek mukavemet-ağırlık oranları nedeniyle sürekli artmaktadır. Bu nedenle, dahili kusurların tespit edilmesini ve ölçülmesini sağlayan etkili bir tahribatsız muayene tekniği, güvenlik açısından kritik yapıların güvenliğini ve güvenilirliğini sağlamak için çok önemlidir ve çok talep edilmektedir. Faz dizi ultrasonik muayene yöntemi; delaminasyon, fiber dalgalılığı, gözeneklilik vb. gibi CFRP yapılarının dahili kusurlarını belirlemek ve değerlendirmek için iyi kurulmuş bir tekniktir [10].

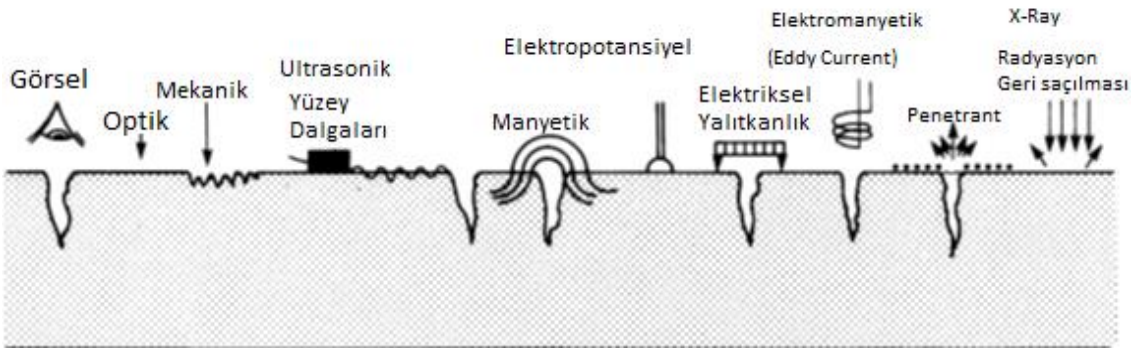
Havacılık ve uzay endüstrisinde bir veya daha fazla nispeten büyük ve düz bölümden oluşan tipik karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) parçaları, birkaçını saymak gerekirse, kaplamalar, flanşlar ve sparlar ve stringerların kirişlerini içerir. Geleneksel ultrason kullanılarak yapılan geleneksel muayeneler, yavaş ve bıktırıcı olma dezavantajına sahiptir. UT faz diziler, bu büyük yapıları hızlı ve güvenilir bir şekilde inceleme yeteneğine sahiptir [11].

Kanat, gövde, iniş takımı, kuyruk takımı ve uçuş kontrol yüzeyleri başta olmak üzere çok sayıda uçak yapıları bulunmaktadır. Uçuş ve yerde bakım hizmetleri sırasında uçak yapılarına yükler uygulanmaktadır. Aynı zamanda uçak yapılarında bulunan malzemeler korozyona karşı savunmasız kalmaktadır. Bu tez çalışmasında; uçak yapılarında oluşan kusurların geleneksel ve faz dizi ultrasonik muayene yöntemleriyle incelenerek karşılaştırılmasıyla, yöntemlerin bu yapılarda kusur tespitine uygunluğunun değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu tez çalışmasının temel hedefi; uygulanılan ultrasonik yöntemlerin kusur tespitindeki yeterliliğinin incelenmesiyle tespit edilen olumsuz sonuçların giderilmesi için bir referans oluşturmasıdır.

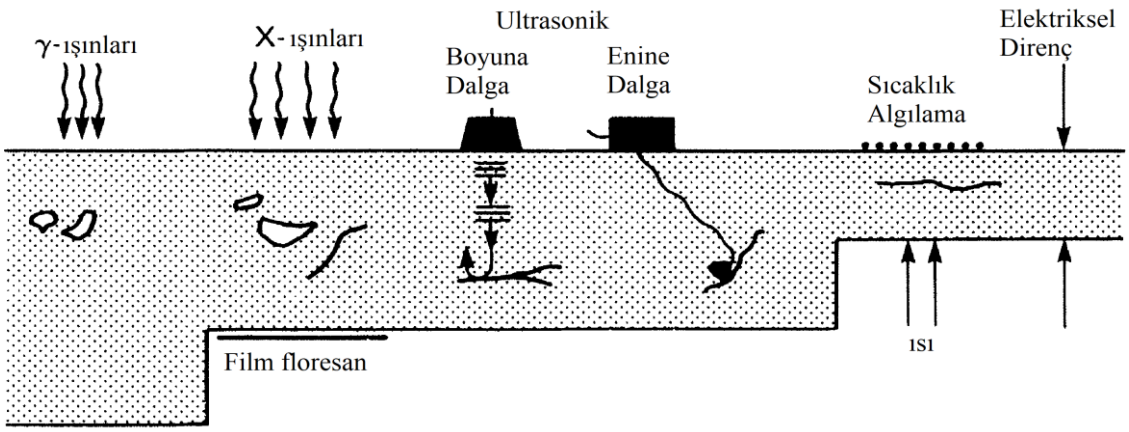
1. BÖLÜM

TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ

Tahribatsız muayene (NDT), bir nesneye zarar vermeden o nesne hakkında bir şeyler öğrenmek için özel ekipman ve yöntemlerin kullanılması olarak açıklanabilir. Tahribatsız muayenenin kullanılması, ağırlıklı olarak kusurlardan kaynaklanan arızaları ortadan kaldırmayı amaçlar. Tahribatsız muayene yöntemleri normalde malzemelerin yüzey özelliklerinin veya iç özelliklerinin incelenmesi için uygun olup olmadıklarına göre sınıflandırılır. Farklı durumlar her zaman farklı kalite seviyeleri gerektirdiğinden her yöntemin hassasiyeti söz konusudur. Bu nedenle uygulama yelpazesi çeşitlilik göstermektedir. Malzemelerin; yüzeysel veya yüzeye yakın kusurlara karşı muayenesi, çeşitli muayene teknikleri için geniş bir kapsam sunar. Yüzey kusur tespitinde; gözle muayene, manyetik parçacık, sıvı penetrant, girdap akımı (eddy current) gibi görsel ve diğer elektromanyetik yöntemler kullanılır. Malzemelerin hacimsel olarak iç kusur tespitinde genellikle radyografik ve ultrasonik teknikler kullanılır [12-13].



Şekil 1.1. Yüzey incelemesi için hasarsız kontrol yöntemleri [13]



Şekil 1.2. Yüzey altı muayenesi için hasarsız kontrol yöntemleri [13]

1.1. Sıvı Penetrant Testi

Sıvı penetrant muayenesi, renkli veya floresan boyanın kusurdan akması yoluyla yüzey kırılma kusurlarını ortaya çıkarmak için kullanılan bir yöntemdir. Teknik, bir sıvının kılcal etki yoluyla bir yüzey kırılma kusuruna çekilebilme yeteneğine dayanmaktadır. Bekleme adı verilen bir sürenin ardından yüzeydeki fazla penetrant çıkarılır ve bir geliştirici (developer) uygulanır. Bu bir kurutma kâğıdı görevi görür. Varlığını ortaya çıkarmak için penetrantı kusurdan çeker. Renkli kontrastlı penetrantlar iyi bir beyaz ışık gerektirirken, floresan penetrantların ultraviyole siyah ışık ile karanlık koşullarda kullanılması gerekir. Sıvı penetrant muayenesinin yardımsız görsel muayeneye göre sunduğu avantaj, kusurların denetçi için daha kolay görülmesini sağlamasıdır. Penetrant muayene sürecinin kusurları daha kolay görülmesini sağlamasının temel olarak iki yolu vardır. İlk olarak sıvı penetrant muayenesi, kusurun kendisinden çok daha büyük ve gözle tespit edilmesi daha kolay olan bir kusur göstergesi üretir. Birçok kusur o kadar küçük ya da dardır ki, çıplak gözle tespit edilememektedir. Sıvı penetrant muayenesinin bir kusurun tespit edilebilirliğini geliştirmesinin ikinci yolu, gösterge ile arka plan arasında yüksek seviyede kontrasta sahip bir kusur göstergesi üretmesi ve ayrıca göstergenin daha kolay görülmesine yardımcı olmasıdır. Görünür bir boya penetrant muayenesi gerçekleştirildiğinde penetrant malzemeleri, beyaz geliştirici arasında yüksek düzeyde kontrast sağlayan parlak kırmızı bir boya kullanılarak formüle edilir. Başka bir deyişle geliştirici, yüksek kontrastlı bir arka plan görevi görmenin yanı sıra, sıkışan penetrantı kusurdan çekmek için bir kurutma kâğıdı görevi görür. Floresan penetrant muayenesi yapıldığında penetrant malzemeleri parlak bir şekilde parlayacak ve loş ışık koşullarında

gözün en hassas olduğu dalga boyunda ışık verecek şekilde formüle edilir. Sıvı penetrant muayene süreci sırasıyla aşağıdaki gibidir.

- Yüzey hazırlığı
- Penetrant uygulanması
- Penetrant bekleme
- Aşırı penetrantın temizlenmesi
- Developer uygulanması
- Developerın yüzeye işlemesi
- Denetleme
- Yüzey temizliği

Sıvı penetrant muayenesi, en yaygın kullanılan tahribatsız değerlendirme yöntemlerinden (NDE) biridir. Popülerliği göreceli kullanım kolaylığı ve esnekliği olmak üzere iki ana faktöre bağlanabilir. Sıvı penetrant muayenesi, yüzeyin aşırı derecede pürüzlü veya gözenekli olmaması koşuluyla hemen hemen her malzemeyi incelemek için kullanılabilir. Sıvı penetrant muayenesi kullanılarak yaygın olarak denetlenen malzemeler; metaller, cam, birçok seramik malzeme, kauçuk ve lastikler olarak sıralanabilir. Sıvı penetrant muayenesi, otomotiv bujilerinden kritik uçak bileşenlerine kadar çok çeşitli uygulamalarda uygulanabildiği için denetimlerin gerçekleştirilmesinde esneklik sunar. Penetrant malzemeler, belirli bir alanda meydana geldiği bilinen kusurları incelemek için sprey kutusu veya pamuklu çubukla uygulanabileceği gibi, geniş alanları hızlı bir şekilde incelemek için daldırma veya püskürtme yoluyla da uygulanabilir. Sıvı penetrant muayenesi yalnızca numunenin yüzeyini kıran kusurları incelemek için kullanılabilir. Bu kusurlardan bazıları; yorulma çatlakları, suverme çatlakları, taşlama çatlakları, aşırı yük ve darbe kırıkları, gözeneklilik, katlanma, döküm çatlakları, kaynaklardaki pim deliklerinde oluşan kusurlar olarak sıralanabilir. Sıvı penetrant muayenesinin avantajları arasında; yüksek duyarlılık, çoğu malzemelere uygulanabilirliği, düşük maliyet ve çabuk muayene, karmaşık geometrik şekillerin rutin incelenebilirliği, penetrant malzemelerinin taşınabilirliği, kusurun malzeme üzerinde açık olarak görünülebilirliği ve ekipmanların nispeten ucuzluğu gösterilebilir. Sıvı penetrant muayenesinin kısıtlamalarına; sadece yüzey kırılma kusurlarının tespit edilebilirliği, yalnızca nispeten gözeneksiz yüzeye sahip malzemelerde incelenebilirlik, ön temizleme gerekliliği, metal lekelerinin temizlenmesi

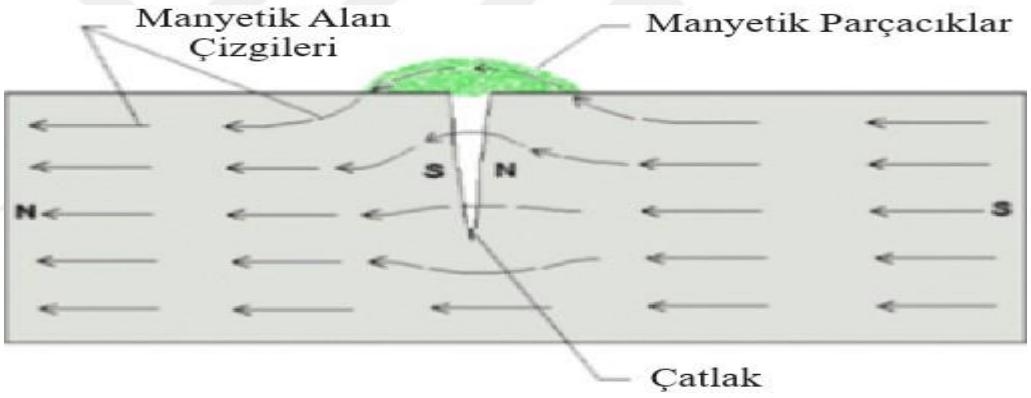
gerekliliği, denetlenen yüzeye doğrudan erişim gerekmesi, yüzey kalitesi ve pürüzlülüğün hassasiyeti etkilemesi, malzemelerin muayene sonrası temizlik gerekliliği ve kimyasalların uygun şekilde bertaraf edilmesi örnek verilebilir [12].

1.2. Manyetik Parçacık Testi

Manyetizma, demir gibi manyetik malzemelerdeki kusurları bulmak için tahribatsız muayene ve değerlendirmede kullanılır. Manyetik parçacık muayenesinde, nesnede manyetik alan oluşturmak için bir mıknatıs veya elektrik akımı kullanılır. Daha sonra nesnenin yüzeyine demir talaşları serpilir. Talaşlar manyetik kuvvet çizgileri boyunca hizalanmalıdır. Bir çatlak veya başka bir kusur mevcutsa, manyetik ince kuvvetler bozulacak ve manyetik parçacıklar kusurun kenarları boyunca kümelenecektir. Manyetik parçacık muayenesi, kusur tespiti için kullanılan tahribatsız bir muayene yöntemidir. Manyetik parçacık muayenesi hızlıdır ve uygulanması nispeten kolaydır ve parça yüzeyi hazırlığı diğer bazı NDT yöntemlerinde olduğu kadar kritik değildir. Bu özellikler manyetik parçacık muayenesini en yaygın kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinden biri haline getirir. Manyetik parçacık muayenesi, bileşenlerdeki kusurları tespit etmek için manyetik alanları ve küçük manyetik parçacıkları kullanır. Denetlenebilirlik açısından tek gereklilik, denetlenen bileşenin demir, nikel, kobalt veya bunların bazı alaşımları gibi ferromanyetik bir malzemeden yapılmış olmasıdır. Ferromanyetik malzemeler, muayenenin etkili olmasını sağlayacak seviyede mıknatıslanabilen malzemelerdir. Yöntem; dökümler, dövmeler ve kaynaklar dahil olmak üzere çeşitli ürün formlarını incelemek için kullanılır. Birçok farklı endüstri, bir bileşenin kullanıma uygunluğunu belirlemek için manyetik parçacık muayenesini kullanır. Manyetik parçacık muayenesini kullanan endüstrilere örnek olarak yapısal çelik, otomotiv, petrokimya, enerji üretimi ve havacılık endüstrileri verilebilir. Su altı muayenesi, açık deniz yapıları ve su altı boru hatları gibi öğeleri test etmek için manyetik parçacık muayenesinin kullanılabileceği başka bir alandır.

Teorik olarak manyetik parçacık denetimi nispeten basit bir kavramdır. Manyetik parçacık testi, manyetik akı sızıntı testi ve görsel test tahribatsız muayene yönteminin birleşimi olarak düşünülebilir. Bir çubuk mıknatısı düşünüldüğünde mıknatısın içinde ve çevresinde manyetik bir alan vardır. Manyetik kuvvet çizgisinin mıknatıstan çıktığı veya girdiği her bir yere kutup denir. Manyetik kuvvet çizgisinin mıknatıstan çıktığı kutba

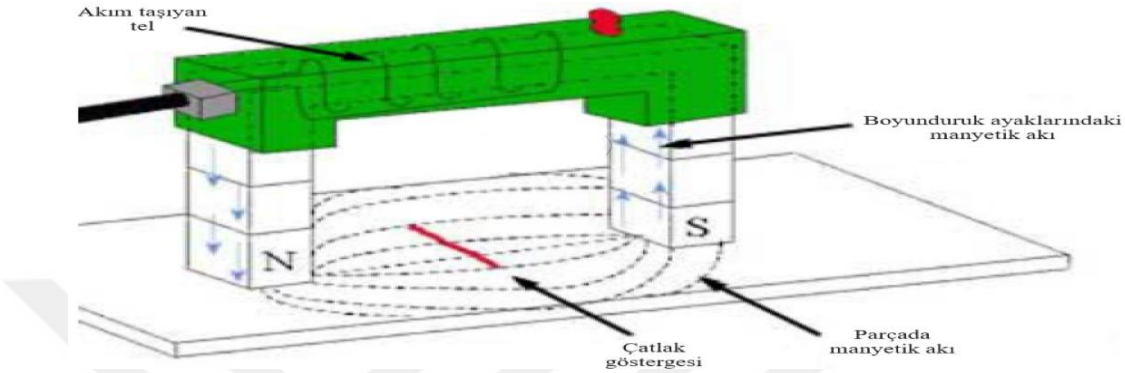
kuzey kutbu, kuvvet çizgisinin mıknatısa girdiği kutba ise güney kutbu denir. Bir çubuk mıknatıs tam ortasından kırıldığında, her bir parçanın her iki ucunda manyetik kutupları bulunan iki tam çubuk mıknatıs elde edilir. Mıknatıs çatlamış ancak tamamen ikiye ayrılmamışsa, çatlağın her iki kenarında birer kuzey ve güney kutbu oluşacaktır. Manyetik alan kuzey kutbundan çıkar ve güney kutbuna tekrar girer. Hava, birim hacim başına mıknatısın destekleyebileceği kadar manyetik alanı destekleyemediği için, çatlağın oluşturduğu küçük hava boşluğuyla karşılaştığında manyetik alan yayılır. Alan yayıldığında malzemeden dışarı sızıyor gibi görünür ve bu nedenle akı sızıntı alanı olarak adlandırılır. Çatlamış bir mıknatısın üzerine demir parçacıkları serpilirse, parçacıklar mıknatısın yalnızca uçlarındaki kutuplara değil, aynı zamanda çatlağın kenarlarındaki kutuplara da çekilip kümelenecektir. Bu parçacık kümesini görmek, gerçek çatlağı görmekten çok daha kolaydır ve bu, manyetik parçacık incelemesinin temelini oluşturur.



Şekil 1.3. Manyetik Alan Kutupları [12]

Manyetik parçacık muayenesindeki ilk adım, muayene edilecek bileşeni mıknatıslamaktır. Yüzeyde veya yüzeye yakın herhangi bir kusur mevcutsa kusurlar bir sızıntı alanı oluşturacaktır. Bileşen mıknatıslandıktan sonra, kuru veya ıslak haldeki demir parçacıkları mıknatıslanmış parçanın yüzeyine uygulanır. Parçacıklar akı sızıntısı alanlarında toplanacak ve kümelenecektir böylece denetçinin tespit edebileceği görünür bir gösterge oluşturulacaktır. Günümüzde manyetik parçacık muayenesinde kullanılan manyetik alanı oluşturmak için kullanılan ekipmanların çoğu elektromanyetizmaya dayanmaktadır. Yani manyetik alanı üretmek için elektrik akımı kullanmaktır. Elektromanyetik boyunduruk, manyetik alan oluşturmak için kullanılan çok yaygın bir ekipman parçasıdır. Temel olarak bir elektrik bobininin yumuşak bir ferromanyetik çelik parçasının etrafına sarılmasıyla yapılır. Akımın ve dolayısıyla manyetik alanın açılıp

kapatılabilmesi için elektrik devresinde bir anahtar bulunur. Duvar prizinden alternatif akımla veya pil paketinden doğru akımla çalıştırılabilirler. Bu tip mıknatıs, mıknatısın kutuplarının incelenen parçaya temas ettiği yerel bir alanda çok güçlü bir manyetik alan üretir.



Şekil 1.4. Elektromanyetik boyunduruk [12]

Manyetik parçacık muayenesinin diğer tahribatsız değerlendirme yöntemlerine göre sahip olduğu avantajlardan biri, kusur göstergelerinin genellikle gerçek kusura benzemesidir. Elektronik bir sinyalin yorumlanması gereken ultrasonik ve girdap akımı muayenesi gibi NDT yöntemlerinde durum böyle değildir. Manyetik parçacık muayenesi kullanıldığında parçanın yüzeyindeki çatlaklar, çatlağın yolunu takip eden keskin çizgiler halinde görünür. Parçanın yüzeyinin altında bulunan kusurlar daha az tanımlanır ve tespit edilmesi daha zordur [12].

1.3. Akustik Emisyon Testi

Akustik Emisyon (AE), bir malzemedeki stresin ani bir şekilde yeniden dağıtılmasıyla üretilen geçici elastik dalgaların üretilmesini ifade eder. Bir yapı harici bir uyarana (basınç, yük veya sıcaklıktaki değişiklik) maruz kaldığında, yerel kaynaklar yüzeye yayılan ve sensörler tarafından kaydedilen stres dalgaları formunda enerji salınımını tetikler. Doğru ekipman ve kurulumla pikometre düzeyindeki (10-12 m) hareketler belirlenebilir. Akustik Emisyon kaynakları depremler ve kaya patlamaları gibi doğal olaylardan, çatlakların başlaması ve büyümesine, kayma ve çıkık hareketlerine, erime, ikizlenme ve metallerdeki faz dönüşümlerine kadar çeşitlilik gösterir. Kompozitlerde matris çatlaması, fiber kırılması ve bağların ayrılması akustik emisyonlara katkıda bulunur. Akustik Emisyon ayrıca diğer malzemelerin yanı sıra polimerler, ahşap ve betonda da ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Akustik Emisyon sinyallerinin tespiti ve analizi,

bir malzemedeki süreksizliğin kökeni ve önemi hakkında değerli bilgiler sağlayabilir. Akustik Emisyon testinin çok yönlülüğü nedeniyle birçok endüstriyel uygulamaya sahiptir (örneğin yapısal bütünlüğün değerlendirilmesi, kusurların tespit edilmesi, sızıntıların test edilmesi veya kaynak kalitesinin izlenmesi) ve bir araştırma aracı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Akustik Emisyon, iki açıdan diğer tahribatsız muayene tekniklerinin çoğundan farklıdır. İlk fark sinyalin kaynağıyla ilgilidir. Akustik Emisyon testi incelenen nesneye enerji sağlamak yerine, yalnızca nesnenin serbest bıraktığı enerjiyi dinler. Akustik Emisyon testleri genellikle yapılar üzerinde çalışırken yapılır çünkü bu, kusurların yayılması ve akustik emisyonların tetiklenmesi için yeterli yükleme sağlar. İkinci fark, Akustik Emisyon testinin bir malzemedeki dinamik süreçlerle veya değişikliklerle ilgilenmesidir. Bu özellikle anlamlıdır çünkü yalnızca aktif özellikler (örn. çatlak büyümesi) vurgulanır. Gelişmekte olan ve durgun kusurları ayırt etme yeteneği önemlidir ancak yükleme akustik bir olaya neden olacak kadar yüksek değilse kusurların tamamen tespit edilememesi mümkündür. Ayrıca, Akustik Emisyon testi genellikle bir bileşenin sağlamlığı veya arıza riskiyle ilgili anında bir gösterge sağlar. Akustik Emisyon testinin diğer avantajları arasında birden fazla sensör kullanarak hızlı ve eksiksiz hacimsel inceleme, proses kontrolü için kalıcı sensör montajı ve bir numuneyi söküp temizlemeye gerek olmaması yer alır. Akustik Emisyon sistemleri bir yapıda ne kadar hasar bulunduğunu yalnızca niteliksel olarak ölçebilir. Bir parçanın boyutu, derinliği ve genel kabul edilebilirliği hakkında niceliksel sonuçlar elde etmek için diğer NDT yöntemleri (genellikle ultrasonik test) gereklidir. Akustik Emisyonun diğer bir dezavantajı, sinyallere dışarıdan gürültü katan yüksek hizmet ortamlarından kaynaklanmaktadır. Başarılı uygulamalar için sinyal ayrımcılığı ve gürültü azaltma çok önemlidir. Akustik emisyon, bir malzeme veya yapı hakkında bilgi toplamanın çok yönlü ve müdahalesiz bir yoludur. Akustik Emisyon testi; boru hatlarını, basınçlı kapları, depolama tanklarını, köprüleri, uçakları ve kamyonetleri ve çeşitli kompozit ve seramik bileşenleri incelemek ve izlemek için uygulanır. Kaynak proseslerinin izlenmesi gibi proses kontrol uygulamalarında da kullanılır [12].

1.4. Termografi

Termal NDT yöntemleri, ısı bir nesneye doğru, nesneden ve/veya nesnenin içinden akarken yüzey sıcaklıklarının ölçülmesini veya haritalanmasını içerir. En basit termal

ölçümler, bir termokupl ile nokta ölçümleri yapmayı içerir. Bu tür ölçüm, sürtünmenin artması nedeniyle aşınan ve ısınmaya başlayan rulmanlar gibi sıcak noktaların tespitinde yararlı olabilir. Daha gelişmiş haliyle, termal görüntüleme sistemlerinin kullanımı, termal bilgilerin geniş bir alan üzerinde ve temassız bir şekilde çok hızlı bir şekilde toplanmasına olanak tanır. Termal görüntüleme sistemleri ışık yerine ısı akışının resimlerini oluşturan cihazlardır. Termal görüntüleme, ayrıntılı termal analiz gerçekleştirmenin hızlı ve uygun maliyetli bir yoludur. Gözetim ve navigasyon yardımı için kullanılan gece görüşü polis ve ordu tarafından, yangın değerlendirmesi ve arama kurtarma için itfaiyeciler ve acil durum kurtarma personeli tarafından, bir teşhis aracı olarak tıp alanında ve enerji denetimleri, önleyici bakım, süreç kontrolü ve tahribatsız testler için endüstride termal ölçüm yöntemleri kullanılmaktadır. Termografik NDT'nin temel dayanağı; bir katının yüzeyinden gelen ısı akışının, ayrılmalar, boşluklar veya kalıntılar gibi iç kusurlardan etkilenmesidir. İstenilen bilgiyi sağlamak için çeşitli termal görüntüleme teknikleri geliştirilmiştir. Bunlar; elektrik ve mekanik sistem muayenesi, korozyon hasarı ve kusur tespitidir [12].

1.5. Radyografi Testi

Radyografi uzun süredir dökümhanelerdeki denetim ve geliştirme çalışmaları için önemli bir araç olmuştur. Buna ek olarak, basınçlı kap, boru hattı, açık deniz sondaj platformu ve diğer birçok endüstride, kaynaklı bileşenlerin proses içi, tamamlanmış veya hizmet içi aşamalarda bütünlüğünü kontrol etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Teknik aynı zamanda havacılık endüstrisinde de uygulama alanı bulmaktadır. Yöntem, X ışınları, gama ışınları (ve nötron kaynakları) gibi yüksek enerjili, kısa dalga boylu elektromanyetik radyasyon kaynaklarının katı malzemelere nüfuz etme yeteneğine dayanır. Numunenin radyasyon kaynağından uzak olan tarafına uygun bir kayıt ortamı, genellikle fotoğraf filmi yerleştirerek ve tekniğin uygun şekilde ayarlanmasıyla, numune yüzeyinin ve iç özelliklerinin bir gölge grafiği veya iki boyutlu görüntüsü elde edilebilir. Dolayısıyla radyografi, iç kusurların tespitine uygun birkaç tahribatsız muayene yönteminden biridir ve bu özelliklerin kalıcı bir kaydının doğrudan üretilmesi gibi ek bir avantaja sahiptir. Endüstriyel radyografide kullanılan gama ışını kaynakları yapay olarak üretilen radyoaktif izotoplardır. Birçok radyoaktif izotop mevcut olmasına rağmen yalnızca birkaçı radyografiye uygundur. Bu kaynaklar sürekli olarak radyasyon yaydıkları için kurşun veya tungsten gibi ağır metallerden yapılmış koruyucu bir kap

içinde muhafaza edilmeleri gerekir. Radyograf almak için kap açıldığında, operatörün zararlı ışınlara maruz kalma riskini azaltmak amacıyla bunun uzaktan kumanda ile yapılması tercih edilir. X-ışınları, yüksek hızlı elektronların katı bir nesneye çarparak durmasıyla üretilir. Radyografide X ışınları, içi boşaltılmış, ağır duvarlı bir cam kap veya tüp içinde üretilir.

Teknoloji gelişerek radyografinin birçok inceleme alanında yaygın olarak kullanılmasına olanak tanıdı. Radyografinin endüstride yalnızca kaynakların ve dökümlerin muayenesi için değil, aynı zamanda hava yastıkları ve konserve gıda ürünleri gibi öğelerin radyografik muayenesi için de yaygınlaştığı görüldü. Radyografi, havaalanlarında ve diğer tesislerde metalurjik malzeme tanımlama ve güvenlik sistemlerinde kullanım alanı bulmuştur. Günümüzde gama ışınları petrokimya, döküm, kaynak ve havacılık gibi endüstrilerde geniş uygulama alanı bulmaktadır. Bilgisayarlı Tomografi (CT), düz X-ışını görüntülerinden bir nesnenin 2 boyutlu ve 3 boyutlu kesit görüntülerini üretmek için güçlü bir NDE tekniğidir. Bir nesnenin iç yapısının boyutları, şekli, iç kusurları ve yoğunluğu gibi özellikleri bilgisayarlı tomografi görüntülerinden kolayca elde edilebilir. Gerçek zamanlı radyografi (RTR) veya gerçek zamanlı radyoskopi, bir görüntünün film yerine elektronik olarak üretildiği NDT yöntemidir. Çoğu durumda, görüntülenen elektronik görüntü, incelenen nesneden geçen radyasyonun ve etkileşim oluştuğunda floresan ışık yayan veya ışık veren bir malzeme ekranıyla etkileşime girmesinden kaynaklanır. Gerçek zamanlı radyografi; otomotiv, havacılık, basınçlı kap, elektronik ve mühimmat endüstrilerinde uygulamaları olan köklü bir NDT yöntemidir [12-13].

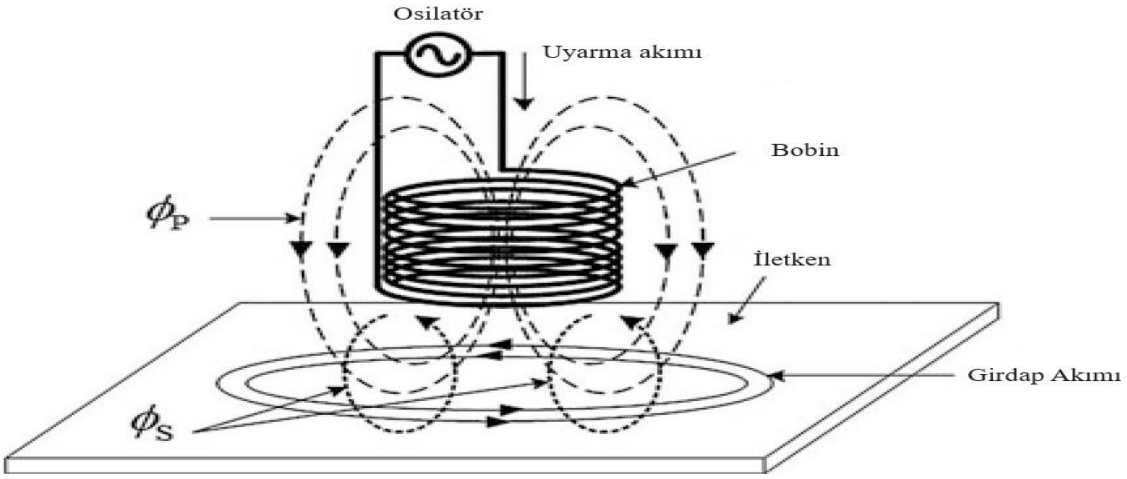
1.6. Gözle Muayene

Birçok durumda kusurlar bileşenlerin yüzeyinde gözle görülebilir. Gözle muayene bilimsel temelinde; bir ürünün yüzeyindeki süreksizlikler, yapısal bozukluklar, yüzey durumu gibi kaliteyi etkileyen parametrelerin optik bir yardımcı (büyüteç gibi) kullanarak veya kullanmaksızın muayene edilmesidir. Gözle muayene çok basit bir metot olarak görünse de kendine özgü incelikleri vardır. Genellikle bir başka tahribatsız muayene metodunun uygulanmasından önce yapılması gereken bir çalışmadır. Zaten diğer tahribatsız muayene yöntemleri için hazırlanmış uygulama standartlarının çoğunda da öncelikle gözle muayene yapılması ve bulguların kaydedilmesi istenir. Bu muayene tekniği, metalik veya metalik olmayan bütün malzemelere uygulanabilir. Muayene

yüzeylerine ulaşılabilirlik durumuna göre gerektiğinde endoskoplar gibi yardımcı gereçler de kullanılabilir. Çoğu durumda muayene yüzeyi hazırlığı olarak yüzey temizliği yapılması istenmez. Daha doğrusu yüzeyin, beklenen kusurların en iyi görüneceği şekilde olması gerekir. Yeterli ışık şartları altında ve uygun bakma açılarında inceleme yapılmalıdır [14].

1.7. Girdap Akımı (Eddy Current) Testi

Çeşitli NDT yöntemlerinde, girdap akımı test (ET) tekniği özellikle elektriksel iletken malzemelerin yüzey ve yüzeye yakın muayenesi ve karakterizasyonu için kullanılmaktadır. Girdap akımı tekniği, incelenecek malzemede elektrik akımlarının indüklenmesi ve bu akımların malzeme ile etkileşiminin gözlemlenmesiyle gerçekleştirilir. Girdap akımları, eddy current probunun uyarma bobini/sarmalları tarafından oluşturulan alternatif elektromanyetik alan tarafından indüklenir ve prob yanıtlarındaki değişiklikler ölçülerek eşzamanlı olarak izlenir. Elektromanyetik bir indüksiyon işlemi olduğu için prob ile muayene hedefi arasında doğrudan elektrik teması gerekli değildir. Hızlı inceleme özelliğinin yanı sıra, girdap akımı muayenesinin test sonucu genellikle elektrik sinyalleri şeklinde olduğundan sinyal işlemeyi kolaylaştırır. Tespit edilen kusurların boyutlandırılması ve değerlendirilmesi tipik olarak ölçülen kusur sinyalleri ile referanslar arasında karşılaştırma yapılarak oluşturulur. Girdap akımı tekniğinin uygulamaları; nükleer enerji santralleri, petrol ve gaz boru hatları, havacılık, otomobil ve diğer endüstrilerdeki imalat ve hizmet içi denetimleri kapsayan çok sayıda ve yaygındır. Girdap akımı testi yapılması diğer NDT yöntemlerinde olduğu gibi sadece düzenli muayene amaçlı olmayıp aynı zamanda yapısal sağlık izleme (SHM) tekniği olarak da kullanılabilmektedir [15].



Şekil 1.5. Girdap akımı testi prensibinin kavram diyagramı [15]

Bir NDT aracı olarak girdap akımının en büyük avantajlarından biri, gerçekleştirilebilecek inceleme ve ölçümlerin çeşitliliğidir. Uygun koşullar altında girdap akımları; çatlak tespiti, malzeme kalınlığı ölçümleri, kaplama kalınlığı ölçümleri, malzeme kimliği, ısı hasarı tespiti, vaka derinliği tespiti ve ısıl işlem izleme için kullanılabilir. Girdap akımı muayenesinin avantajları arasında; küçük çatlaklara ve diğer kusurlara karşı hassaslığı, yüzey ve yüzeye yakın kusurları tespit edebilmesi, muayene anında sonuç vermesi, ekipmanların taşınabilirliği, yöntemin kusur tespitinden çok daha fazlası için kullanılabilirliği, minimum parça hazırlığı gerekliliği, test probunun parçaya temas etmesine gerek olmaması ve iletken malzemelerin karmaşık şekil ve boyutlarını inceleyebilmesi yer alır. Girdap akımı denetiminin sınırlamaları arasında; yalnızca iletken malzemelerin incelenebilirliği, yüzeyin prob için erişilebilir olması gerekliliği, gerekli beceri ve eğitimin diğer tekniklerden daha kapsamlı oluşu, yüzey kalitesi ve pürüzlülüğün oluşturabileceği engeller, kurulum için gereken referans standartları, penetrasyon derinliğinin sınırlılığı ve prob bobini sarımına ve prob tarama yönüne paralel uzanan delaminasyonlar gibi kusurlar tespit edilemeyişi yer alır [15].

1.8. Ultrasonik Test

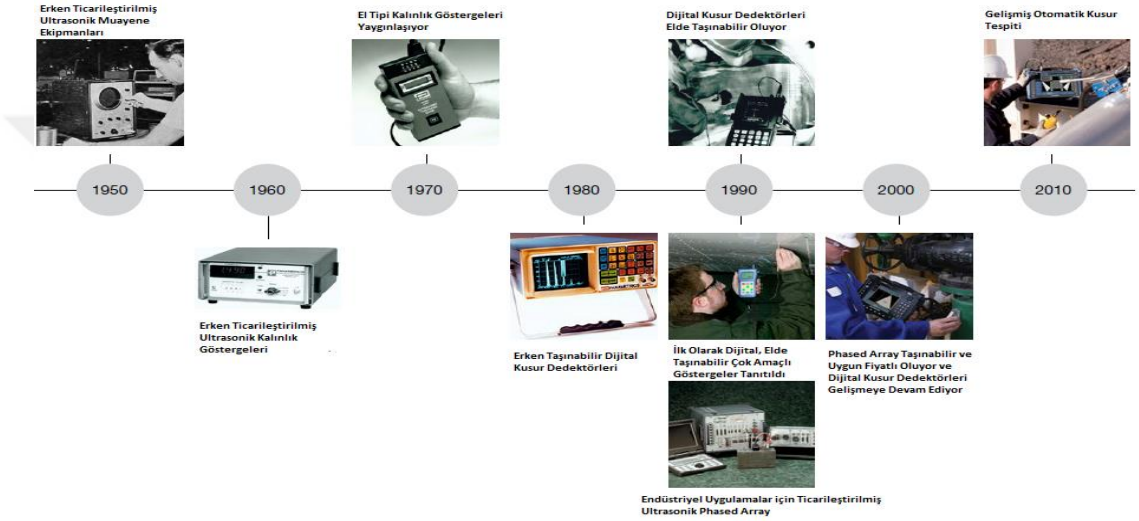
Ultrasonik test (UT), endüstriyel kompanentlerin test edilmesi için kullanılan en kapsamlı NDT yöntemlerinden biridir. Ultrasonik test (UT); yüzey, yüzey altı ve iç kusurları tespit etmek ve değerlendirmek için kullanılan en güçlü NDE tekniklerinden biridir. Çoğu metalde, malzeme kalınlığı çoğu NDT yöntemi için sınırlayıcı bir faktör iken, ultrasonik

teknik yoluyla birkaç metre derinliğe kadar kusurlar tespit edilebilir. Ultrasonik test, eklemeli imalat ürünlerini test etmek için yüksek potansiyele sahiptir [16].

Ultrasonik muayene; malzeme içerisindeki kusurların ve kusur bölgesinin yerinin tespit edilmesinde, ayrıca bunların akustik olarak ekrana aktarılmasıyla bu kusurların değerlendirilmesinde, parçaların kalınlık ölçümünde kullanıldığı gibi, yüksek frekanslı ses dalgalarıyla katı ve sıvıların temel mekanik, yapısal ve bileşim özelliklerinin ölçümlerinde de kullanılabilir [17].

Ultrasonik test cihazları, altmış yılı aşkın bir süredir endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. 1940'lardan beri, yüksek frekanslı ses dalgalarının katı malzemelerden yayılmasını yöneten fizik yasaları; metaller, kompozitler, plastikler ve seramiklerdeki gizli çatlakları, boşlukları, gözenekliliği ve diğer dahili süreksizlikleri tespit etmek, kalınlığı ölçmek ve malzeme özelliklerini analiz etmek için kullanılmıştır. Ultrasonik test tamamen tahribatsız ve güvenlidir ve birçok temel imalat, süreç ve hizmet endüstrisinde, özellikle kaynak ve yapısal metalleri içeren uygulamalarda, köklü bir test yöntemidir. Ultrasonik testlerin büyümesi, elektronik ve bilgisayarlardaki gelişmelere büyük ölçüde paraleldir. 1930'larda Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan ilk çalışmalar, yüksek frekanslı ses dalgalarının gizli kusurlardan veya malzeme sınırlarından öngörülebilir şekillerde yansıyacağını ve osiloskop ekranlarında görüntülenebilen farklı yankı şekilleri üreteceğini gösterdi. İkinci Dünya Savaşı sırasında sonar gelişimi, ultrasonik araştırmalar için daha fazla ivme sağladı. 1945'te ABD'li araştırmacı Floyd Firestone, bugün yaygın olarak kullanılan darbe yankı tekniğini kullanan, genellikle ilk pratik ticari ultrasonik kusur dedektörü olarak kabul edilen ses üstü yansıtaç adını verdiği bir aletin patentini aldı. Bu gelişme ilerleyen yıllarda tanıtılan birçok ticari aletin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Panametrics, Staveley ve Harisonic, 1960'larda ve 1970'lerde ultrasonik kusur dedektörleri, kalınlık ölçerler ve dönüştürücülerin geliştirilmesinde liderler arasındaydı. 1940'ların sonlarında, Japonya'daki araştırmacılar, doku katmanlarının iki boyutlu bir profil görüntüsünü sağlayan B-tarama ekipmanını kullanarak tıbbi teşhiste ultrasonik testin kullanılmasına öncülük ettiler. 1960'lara gelindiğinde, tıbbi tarayıcıların ilk versiyonları tümörleri, safra taşlarını ve benzer durumları tespit etmek ve ana hatlarıyla belirtmek için kullanılıyordu. 1970'lerde, hassas kalınlık ölçerlerin piyasaya sürülmesiyle ultrasonik test yalnızca bir tarafa erişimin

olduğu durumlarda parçaların kalınlık ölçümünü gerektiren çok çeşitli üretim operasyonlarında kullanıldı ve metal borular ve tanklarda kalan duvar kalınlığını ölçmek için korozyon ölçerler yaygın olarak kullanılmaya başlandı. Ultrasonik aletlerdeki en son gelişmeler, dijital sinyal işleme tekniklerine ve 1980'lerden itibaren kullanıma sunulan ucuz mikroişlemcilere dayanmaktadır. Bu durum; kusur tespiti, kalınlık ölçümü ve akustik görüntüleme için son derece güvenilir ve taşınabilir cihazların ve hat içi inceleme sistemlerinin piyasaya sürülmesine yol açmıştır [18].



Şekil 1.6. Ultrasonik test cihazlarının tarihsel değişimi [18]

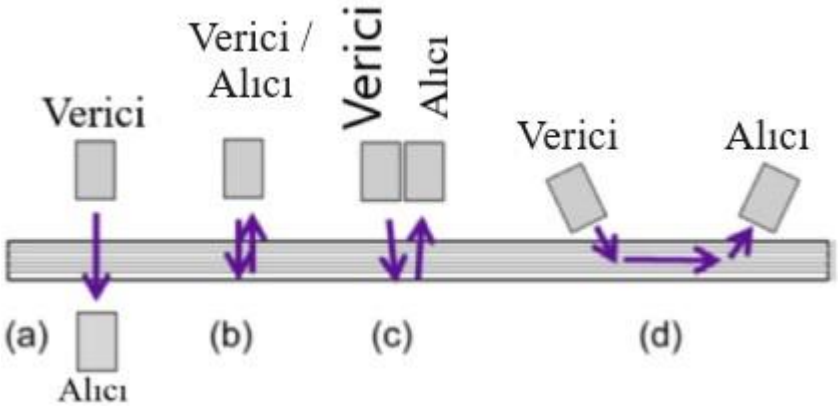
Yüksek frekanslı ses dalgalarının yansıması ve iletimi, uzun zamandır kaynakların bütünlüğünü değerlendirmek ve ayrıca yapısal metalleri, boruları ve tankları, kazan borularını, demiryolu raylarını ve akslarını, havacılık kompozitlerini ve diğer birçok endüstriyel uygulamayı test etmek için önemli bir araç olmuştur. Kalifiye bir operatör tarafından uygun şekilde kullanıldığında, ultrasonik NDT hızlı ve güvenilirdir. Genellikle ultrasonik bağlayıcı ile ıslatma dışında herhangi bir test parçası hazırlığı gerektirmez ve kullanımıyla ilgili özel güvenlik tehlikeleri veya düzenleyici lisans gereklilikleri yoktur. Ultrasonik kusur tespiti, uzun yıllardır değerli bir kalite güvence aracı olmuştur. Ultrasonik kusur tespiti; gizli çatlaklar, korozyon, boşluklar, gözenekler, kalıntılar ve benzer süreksizlikleri bulmak için herhangi bir standart mühendislik malzemesine uygulanabilir. Çoğu test; çelik ve diğer yapısal metalleri içerirken, kusur dedektörleri plastikler, kompozitler, cam elyafı ve seramiklerde de kullanılabilir [18].

Bir uçak gövdesinin büyük ince yapılarının testleri için, ultrasonik dalgaların optik görüntülenmesi kullanılan bir yöntemdir [19].

Geleneksel ultrasonik teknikte, test parçasına doğru ultrasonik dalgalar yayılır ve kusurlarla etkileşimleri, kusurları tespit etmek ve değerlendirmek ve test bileşeninin bütünlüğünü sağlamak için kullanılır. Ultrasonik test, temas veya daldırma modunda gerçekleştirilebilir. Temas modunda, ultrasonik prob test parçası ile doğrudan temas halindeyken daldırma testinde prob ve test parçası arasında bir su tabakası bulunur. Çoğu temas testinde, ultrasonik dalgaların malzemeye iletilmesini kolaylaştırmak için test yüzeyine ince bir kuplaj tabakası uygulanır. Daldırma ultrasonik test hem test parçasının hem de probun bir su tankına daldırılmasıyla veya test parçasının sadece bir kısmının suyla temas halinde olduğu diğer daldırma ultrasonik teknikleri ile gerçekleştirilir [16].

Kusurlar için bir incelemenin genellikle iki aşaması vardır. Bir tespit aşaması ve bir değerlendirme aşaması ve tipik olarak üç tür prosedür vardır. İlk prosedür seti, aletlerin düzgün çalıştığından, örneğin yükselticilerin lineer bir rejimde çalıştığından emin olmak için kalibrasyonla ilgilidir. İkinci prosedür grubu, denetimin tespit aşamasını yönetir. Nihai prosedür seti, tespit edilen kusurlar daha ayrıntılı olarak incelendiğinde ve parçanın reddedilmesi için yeterli önemde olup olmadığına karar verildiğinde değerlendirme aşamasında kullanılır. Prosedürler çeşitli organlar tarafından belirlenir. Bu yapılara; profesyonel topluluklar, düzenleyici kurumlar ve bireysel şirketler dahildir [20].

UT'nin birçok çeşidi vardır. Ultrasonun temel yöntemleri arasında iletim yoluyla ultrason (TTU), darbe-yankı (PE) ve gönderme-algılama bulunur. Ek olarak ultrason yöntemleri; yönlendirilmiş (kılavuzlu) dalga, rezonans ve bağ testi yöntemlerini içerebilir. Bu tanımlamalar içerisinde ne yapılabileceği ve sinyalin nasıl kullanılabileceği konusunda bir takım ince ayrımlar bulunmaktadır. Şekil 1.7’de iletim yoluyla ultrason, darbe yankı, gönderme-algılama ve yönlendirilmiş (kılavuzlu) dalga yöntemlerinin konfigürasyonu kabaca gösterilmektedir [21].



Şekil 1.7. Tipik ultrasonik konfigürasyonlar; (a) iletim yoluyla ultrason, (b) darbe yankı, (c) gönderme-algılama ve (d) yönlendirilmiş (kılavuzlu) dalgalar [21]

İletim yoluyla ultrason yöntemi kompozitlerin ultrasonik muayenesi için en sık kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde, incelenecek kompozitin içinden geçen, verici bir dönüştürücüden alıcı bir dönüştürücüye ultrasonik bir sinyal gönderilir. Alınan sinyal gücü, akustik zayıflama ile ölçülen parça kalitesinin bir ölçüsüdür. Gözeneklilik, kalıntılar, kırışıklıklar vb. gibi etkilerle kalitenin düşürülmesi akustik zayıflamayı artıracak ve ölçülen sinyal gücünü azaltacaktır. Ultrason frekansını örneğin 5'ten 1 MHz'e düşürmek aynı zamanda kompozitin zayıflamasını da azaltacak, inceleme yöntemini daha kalın kompozitler için daha nüfuz edici hale getirecek ancak aynı zamanda bazı kalıntı türleri gibi ince özelliklere karşı da daha az duyarlı hale getirecektir. Delaminasyon ve ayrılmalar sinyali neredeyse engelleyerek tespit edilmelerini kolaylaştırır. İletim yoluyla ultrasonun nüfuz etme gücü, onu özellikle petek veya köpük çekirdekli veya çok kalın veya zayıflatıcı yapılara sahip sandviç yapılı kompozitler için faydalı kılar. İletim yoluyla ultrasonun dezavantajı parçanın her iki tarafına da erişimin gerekli olmasıdır. İki dönüştürücü birbiriyle hizalanmalı ve aynı zamanda tarama sisteminin kavisli parçalar üzerindeki yönelimi koruyacağı şekilde yüzeye normal olmalıdır. Alıcı dönüştürücü tarafından algılanan sinyal genellikle konumun bir fonksiyonu olarak çizilir ve C-tarama ekranı olarak adlandırılır. İletim yoluyla ultrason C-tarama ekranı, bir özelliğin parça alanında nerede bulunabileceğini gösterecektir ancak parçadaki derinliğini göstermez.

Darbe-yankı yöntemi tek taraflıdır ve hem verici hem de alıcı olarak tek bir dönüştürücü kullanılır. Herhangi bir noktada elde edilen çıktıya, sinyal genliğinin zamana göre grafiği olan A taraması adı verilir. A taraması genellikle denetçiler tarafından incelenen parçanın durumunu yorumlamak için kullanılır. Sinyal, parça içindeki yansımalardan gelen zaman

bazlı bir yanıttır. İyi bir iletimi göstermek için parçanın arka duvarından güçlü bir yankı olup olmadığı kontrol edilir. Ayrıca denetçi, kalıntı veya katmanlara ayrılmayı belirlemek için parçanın ön yüzeyi ile arka duvarı arasındaki dahili konumlardan yankı belirtileri arayacaktır. Parçanın gözenekliliği varsa, arka duvar yankısı azalacak veya kaybolacaktır ancak bir kalıntı veya katmanlara ayrılmadan dolayı dağınık iç gözeneklilikten önemli bir yansıma olmayabilir. Darbe-yankı yöntemi, parça üzerinde herhangi bir noktada elde taşınır bir aletle veya dönüştürücünün yüzeyde hareket ettiği bir tarama modunda, bir su tankında veya bir su fışkırtma sistemiyle kullanılabilir.

Gönderme-algılama yönteminde biri verici, diğeri alıcı olarak iki ultrason dönüştürücü kullanılır. Bununla birlikte, iletim yoluyla ultrason yönteminden farklı olarak, gönderme-algılama dönüştürücüleri parçanın aynı tarafında olabilir veya ultrasonun bir dönüştürücüden diğerine ilerlemesi için çeşitli şekillerde yönlendirilebilir. Yorumlama genellikle tespit edilen sinyal gücü veya frekansındaki değişikliklere dayanır ve bilinen bir test örneğine göre kalibre edilir.

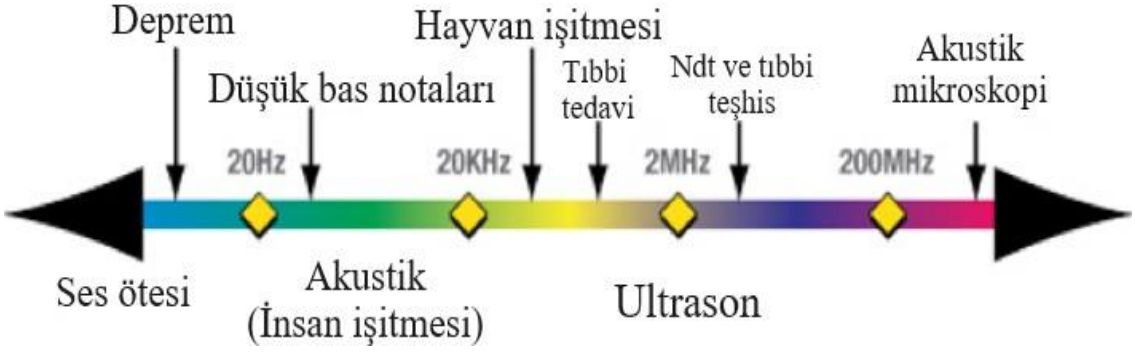
Ultrason; boyuna, enine, yönlendirilmiş dalgalar veya yüzey dalgaları dahil olmak üzere çeşitli modlarda çalışabilir. Bu modlardan boyuna dalga, iletim yoluyla ultrason ve darbe-yankı c-taramaları için en yaygın olarak kullanılanıdır. Enine dalgalar, boyuna dalgalara göre daha kısa dalga boyundan dolayı kaynaklar gibi metalik muayenelerde sıklıkla kullanılır. Polimer kompozitlerde, yerleşimindeki anizotropiden dolayı enine dalgaların etkili bir şekilde kullanılması zorlaşır. Kompozit muayenede Lamb dalgalarını da içeren yönlendirilmiş dalgalar kullanılır. Bu dalgalara bazen "yapısal dalgalar" adı verilir ve NDT için kullanıldığında önemli ölçüde yorum gerektirebilir. Yüzey veya Rayleigh dalgaları metallerdeki yüzey çatlakları için faydalıdır ancak kompozitler için pek fazla uygulama görmemişlerdir.

Ultrason için yaygın olarak kullanılan diğer iki seçenek rezonans ve bağ testidir. Rezonans modunda, ultrasonik dönüştürücünün bir parça üzerine yerleştirilmesi dönüştürücünün çalışmasında empedans değişikliğine neden olacaktır. Empedans etkisi, parça üzerinde hareket ettirilen dönüştürücü sinyalinin genliği ve fazındaki değişiklik olarak algılanır. Rezonans tarama, kompozit kalınlığındaki veya sandviç yapı kalitesindeki değişikliklere karşı çok hassas olabilir. Rezonans denetimi için kullanılan frekans genellikle yüzlerce kilohertzin altındadır. Bağ testi cihazı konfigürasyonunda,

yapının tek bir tarafında vericiden alıcıya genellikle onlarca kilohertz aralığında düşük frekanslı iletimle bir gönderme-algılama düzenlemesi kullanılır. Bağ testi en çok sandviç yapıların ön yüzeyleri gibi ince laminat katmanlara uygulanabilir [21].

1.8.1. Ultrason (Ses Üstü Dalga)

Ses dalgaları; katı, sıvı veya gaz olabilen bir ortamda hareket eden basit bir şekilde organize edilmiş mekanik titreşimlerdir. Bu durum hem duyduğumuz günlük sesler hem de kusur tespiti için kullanılan ultrason için geçerlidir. Ses dalgaları; bilinen bir ortamda belirli bir hızda, tahmin edilebilir bir yönde hareket edecek ve farklı bir ortam sınırıyla karşılaştıklarında basit kurallara göre yansıtılacak veya iletilecektir. Ultrasonik kusur tespitinin altında yatan fizik prensibi budur. Kısacası, ultrasonik dalgalar bir test parçasındaki çatlaklardan veya diğer süreksizliklerden yansır böylece bir parçadaki eko modelini izleyerek eğitimli bir operatör gizli dahili kusurları tespit edebilir ve bulabilir. Tüm ses dalgaları, alışık işitilebilir ses aralığında perde olarak deneyimlediğimiz belirli bir frekansta veya saniyedeki titreşim veya döngü sayısında salınır. İnsan işitmesi; saniyede yaklaşık 20.000 döngü (20 KHz) maksimum frekansa kadar uzanırken, ultrasonik kusur tespit uygulamalarının çoğu, saniyede 500.000 ila 10.000.000 döngü (500 KHz ila 10 MHz) arasındaki frekansları kullanır. Megahertz aralığındaki frekanslarda, ses enerjisi hava veya diğer gazlar arasında verimli bir şekilde yayılmaz ancak çoğu sıvı ve çoğu metal, plastik, seramik ve kompozit gibi yaygın mühendislik malzemeleri arasında serbestçe yayılır. Ultrasonik aralıktaki ses dalgaları, işitilebilir sesten çok daha yönlüdür ve kısa dalga boyları nedeniyle yollarına çıkan küçük yansıtıcılara karşı çok daha hassastırlar. Bir ses dalgasının hızı, içinden geçtiği ortama göre değişir ve ortamın yoğunluğu ve elastik özelliklerinden etkilenir. Farklı ses dalgaları farklı hızlarda yol alacaktır [18].



Şekil 1.8. Ses frekans aralıkları [18]

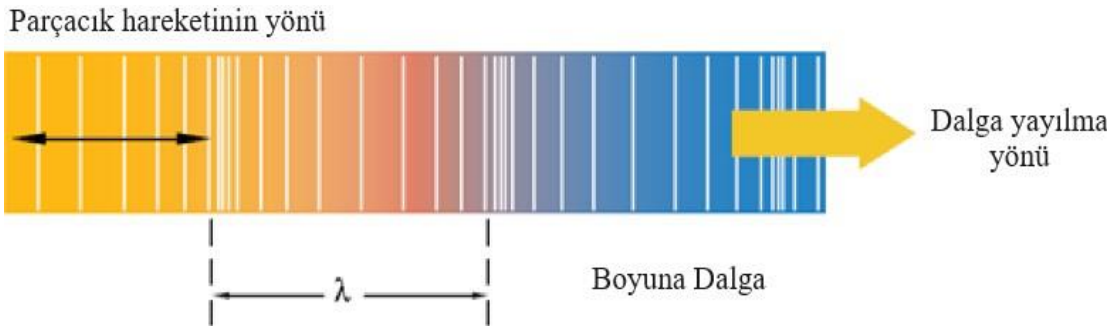
Ultrasonik dalgalar, yığın dalgalar ve yönlendirilmiş dalgalar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Yığın dalgalar ya boyuna ya da enine dalgalarıdır. Yönlendirilmiş dalgalar daha geniş bir çeşitliliğe sahiptir ancak ultrasonik testlerde en popüler olanlar yüzey (Rayleigh) dalgaları ve plaka (lamba) dalgalarıdır. Ultrasonik testlerin çoğu, boyuna veya enine dalgalar yoluyla toplu dalgalar kullanılarak yapılır. Belirli koşullar altında, bu iki dalga birbirine dönüşebilir. Bir arayüz ile etkileşim üzerine; ultrasonik dalgalar yansıyabilir, kırılabilir, saçılabilir veya mod dönüştürülebilir. Ultrasonik dalgalar farklı yollarla üretilir ve alınır. Ultrasonik dalgalar üretmenin ve almanın en yaygın yolu bir piezoelektrik dönüştürücü kullanmaktır. Piezoelektrik dönüştürücüler hem verici hem de alıcı görevi görür. Ultrasonik dalgalar üretmenin diğer yöntemleri arasında elektromanyetik akustik dönüştürücüler, kapasitif mikro işlenmiş ultrasonik dönüştürücüler, manyetostriktif dönüştürücüler ve lazer ultrasonikler bulunur [16].

1.8.2. Dalga yayılımı

Kusur tespitinde kullanılan ses enerjisi, dalganın yönüne ve test parçasındaki moleküllerin hareketine bağlı olarak farklı dalga modlarında hareket eder. En yaygın olarak kullanılan modlar; boyuna dalgalar, enine dalgalar ve yüzey dalgalarıdır [18].

1.8.2.1. Boyuna dalgalar

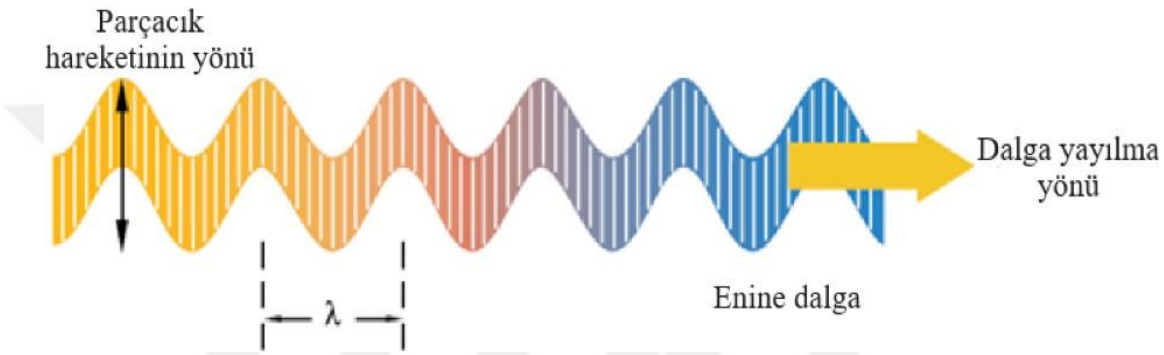
Boyuna dalgada, ortamdaki parçacık hareketi dalga cephesinin yönüne paraleldir. İşitilebilir ses dalgaları boyuna dalgalardır. Boyuna dalgalar, ultrasonik NDT'de yaygın olarak kullanılan dalga modlarının en hızlısıdır. Çelikte saniyede yaklaşık 5900 metreye (mikrosaniyede 0,23 inç) ulaşır. Boyuna dalgalar, kırılma veya yansıma yoluyla enine dalgalara dönüşebilir [18].



Şekil 1.9. Boyuna Dalga [18]

1.8.2.2. Enine dalga

Bir enine dalgada, parçacık hareketi dalga yönüne diktir. Enine dalga, aynı frekanstaki boyuna dalgalardan daha yavaş bir hıza ve daha kısa dalga boyuna sahiptir ve ultrasonik kusur tespitinde çoğu açı ışını testi için kullanılır. Çelikteki enine dalga hızı saniyede yaklaşık 3250 metredir (mikrosaniyede 0,128 inç). Enine dalga, sıvılarda veya gazlarda değil yalnızca katılarda bulunabilir. Bir sınırda yansıma veya kırılma yoluyla boyuna dalgalara dönüşebilirler [18].



Şekil 1.10. Enine Dalga [18]

1.8.2.3.Yüzey dalgaları

Rayleigh dalgaları olarak da bilinen yüzey dalgaları, bir test parçasının yüzeyi boyunca bir dalga boyu derinliğinde hareket eden salınım hareketini temsil eder. Hız ve dalga boyu, enine dalgalara benzer. Okyanus dalgaları yüzey dalgalarına bir örnektir. Yüzey dalgaları, bir test parçasında yüzey kıran çatlakları tespit etmek için kullanılabilir [18].

1.8.3. Ses Dalgalarının Temel Özellikleri

a. Frekans

Birim zamanda oluşan tekrar sayısına frekans denir**.** Frekans, 19. yüzyıl Alman fizikçisi Heinrich Rudolf Hertz'in ismiyle adlandırılan hertz biriminde ölçülür. Hertz ölçümü Hz olarak kısaltılır ve saniye başına geçen dalgaların sayısı demektir. Frekansını ölçmek için bir olayın belirli bir zaman aralığında kaç kere tekrar ettiği sayılır sonra bu sayı zaman aralığına bölünerek frekans elde edilir.

$$F = 1 / T \qquad (1.1.)$$

Burada; F değeri frekans ve T değeri periyot değerlerini temsil etmektedir.

b. Periyot

Elektrikte ve fizikte, bir tam dalganın oluşması için geçen süreye periyot denir. T harfi ile gösterilir. Frekans ile ters orantılıdır. Birimi saniyedir. Bir eğrinin sıfırdan başlayarak pozitif maksimum değere yükselmesi, tekrar düşerek sıfıra ve negatif maksimum değere inmesi, buradan da tekrar sıfıra ulaşmasına döngü denir. Bir döngünün tamamlanması için geçen zamana periyot denir. Yani döngü bir tam dalga turuna verilen isim, periyot ise bu dalga turunun gerçekleştiği süredir.

c. Genlik

Genlik, bir dalganın tepesinden çukuruna kadar olan düşey uzaklığın yarısıdır. Genlik, periyodik bir harekette maksimum düzey olarak da tanımlanabilir. Genlik, periyodik olarak değişen bir miktarın maksimum mutlak değeridir.

d. Dalga Boyu

Dalga boyu, bir dalga grubunun tekrarlanan birimleri arasındaki mesafedir. Sembol olarak lamda (λ) harfi ile gösterilmektedir. Dalga boyunun, frekans ile ters orantılı bir ilişkisi vardır. Dalga boyu uzadıkça frekans azalır. Çoğu durumda, dalganın boşlukta ilerlediğinin kabulü ile dalga hızı (v) ışık hızı (c) olarak seçilir.

$$\lambda = v / f \qquad (1.2.)$$

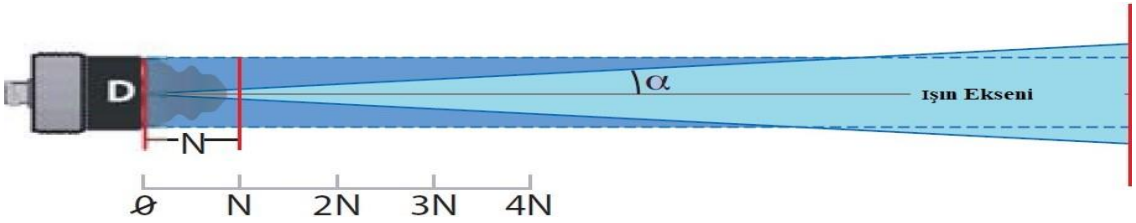
Burada; λ değeri dalga boyu, v değeri dalga yayılma hızı, f değeri dalganın frekansı ve c değeri ise ışık hızını temsil etmektedir.

e. Dalga cephesi oluşumu

Tek elemanlı bir dönüştürücü; bir piston kaynağı, tek bir disk veya test ortamında ileriye doğru itilen bir plaka olarak düşünülebilirken, ürettiği dalga, çok sayıda nokta kaynaktan gelen dalgaların toplamı olarak matematiksel olarak modellenebilir. Bu; ilk olarak on yedinci yüzyılda Hollandalı fizikçi Christian Huygens tarafından önerilen ve ilerleyen, bir dalga cephesindeki her noktanın yeni bir küresel dalga başlatan bir nokta kaynağı olarak düşünülebileceğini ve sonuçta ortaya çıkan tüm bu özgün küresel dalgaların toplamı birleşik dalga cephesinin bir nokta kaynağı olarak düşünülebileceğini belirten Huygens ilkesinden kaynaklanmaktadır [22].

f. Işın yayılması

Prensipte; bir dönüştürücü tarafından üretilen ses dalgası, malzeme sınırıyla karşılaşana kadar düz bir çizgide hareket eder. Ancak ses yolunun uzunluğu yakın alan mesafesinden daha uzunsa, ışının çapı da artar ve bir spot ışığı gibi uzaklaşır.



Şekil 1.11. Işın yayılması [22]

Odaklanmamış dairesel bir dönüştürücünün ışın yayılma açısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$N = \frac{D^2 f}{4c} = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (1.3.)$$

Burada; N değeri yakın alan uzunluğu, D değeri eleman çapı veya açıklığı, f değeri frekans, c değeri test malzemesindeki ses hızı, λ değeri ise dalga boyunu temsil etmektedir.

g. Zayıflama

Bir ortamdan geçerken, ultrasonik bir dönüştürücü tarafından üretilen organize dalga cephesi, herhangi bir malzemenin mikro yapısı yoluyla enerjinin kusurlu iletimi nedeniyle bozulmaya başlar. Organize mekanik titreşimler (ses dalgaları), dalga cephesi artık algılanamaz hale gelene kadar rastgele mekanik titreşimlere (ısı) dönüşür. Bu süreç ses zayıflaması olarak bilinir [22].

h. Dik bir düzlem sınırında yansıma ve iletim

Bir ortamda ilerleyen bir ses dalgası, dalganın yönüne dik uzanan farklı bir ortamın sınırıyla karşılaştığında, dalga enerjisinin bir kısmı doğrudan geri yansır ve bir kısmı dümdüz devam eder. Yansımaya karşı iletim yüzdesi, iki malzemenin nispi akustik empedansları ile ilgilidir ve akustik empedans, malzeme yoğunluğu ile ses hızının çarpımı olarak tanımlanır. Düzlemsel bir sınırdaki yansıma katsayısı (kaynağa geri yansıyan ses enerjisinin yüzdesi) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

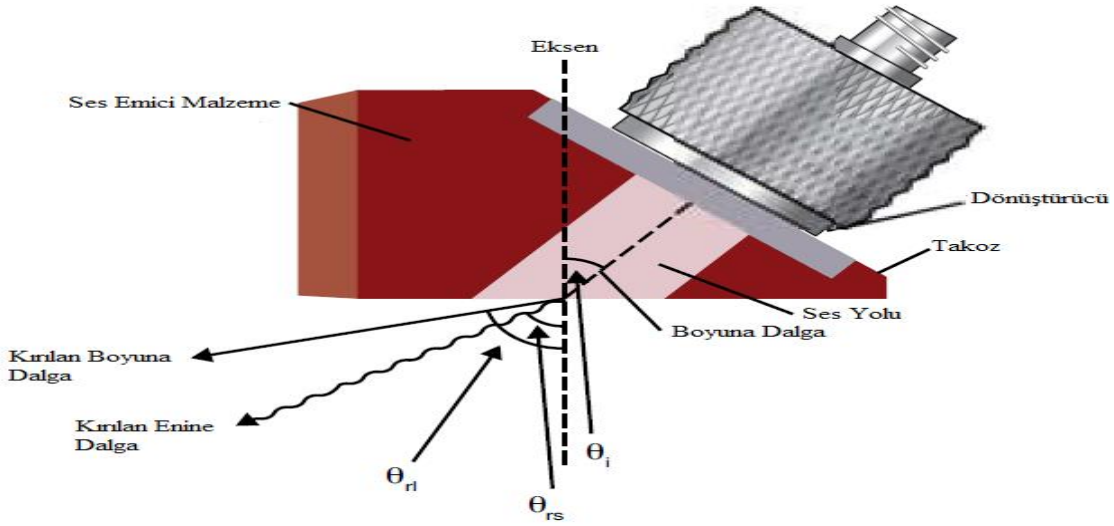
$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1.4.)$$

Burada; R değeri yüzde olarak yansıma katsayısı, Z_1 değeri birinci ortamın akustik empedansı ve Z_2 değeri ise ikinci ortamın akustik empedansını temsil etmektedir.

Bu denklemden, iki malzemenin akustik empedansları daha benzer hale geldikçe yansıma katsayısının azaldığı ve akustik empedanslar daha az benzer hale geldikçe yansıma katsayısının arttığı görülebilir. Teoride, aynı akustik empedansa sahip iki malzeme arasındaki sınırdan yansıma sıfır iken, çok farklı akustik empedanslara sahip malzemeler durumunda, çelik ve hava arasındaki bir sınırda olduğu gibi, yansıma katsayısı %100'e yaklaşır [22].

j. Dik olmayan sınırlarda kırılma ve mod dönüşümü

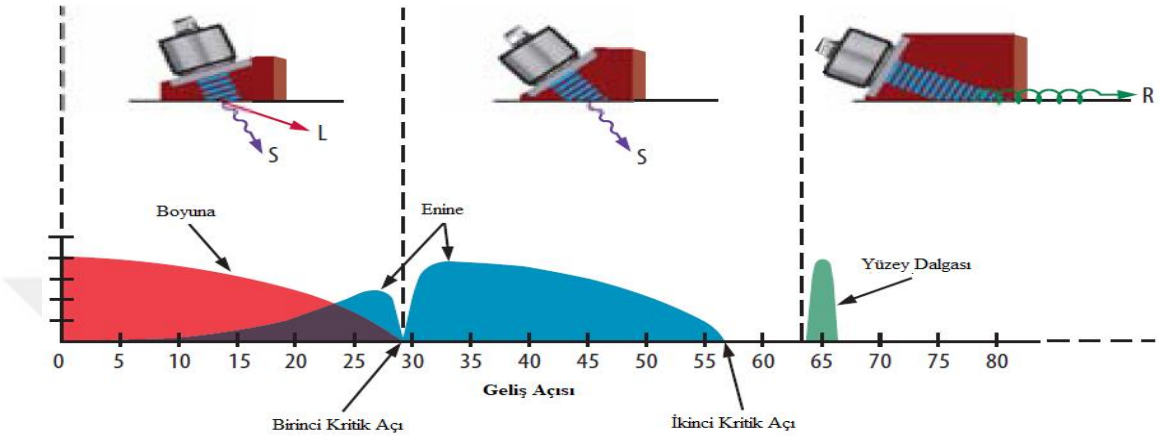
Bir malzemeden geçen bir ses dalgası; sıfır dereceden farklı bir açıda farklı bir malzemenin sınırıyla karşılaştığında, dalga enerjisinin bir kısmı gelme açısına eşit bir açıyla ileriye doğru yansıtılır. Aynı zamanda, dalga enerjisinin ikinci malzemeye iletilen kısmı, on yedinci yüzyıl matematikçisi tarafından bağımsız olarak türetilen Snell yasasına göre kırılır. Snell yasası, geliş ve kırılma açısının sinüsleri aşağıda gösterildiği gibi her malzemedeki dalga hızıyla ilişkilendirir [22].



Şekil 1.12. Ses dalgası kırılması ve mod dönüşümü [22]

$$\frac{\sin\theta_i}{c_i} = \frac{\sin\theta_{rl}}{c_{rl}} = \frac{\sin\theta_{rs}}{c_{rs}} \quad (1.5.)$$

Burada; θ_i değeri takozun geliş açısı, θ_{rl} değeri kırılan boyuna dalganın açısı, θ_{rs} değeri kırılan enine dalganın açısı, c_i değeri gelen malzemenin hızı (boyuna), c_{rl} değeri malzeme ses hızı (boyuna) ve c_{rs} değeri ise test malzemesinin hızını (enine) temsil etmektedir.



Şekil 1.13. Dalga modlarının bağıl genliği [22]

İkinci ortamdaki ses hızı birinciden daha yüksekse, belirli açıların üzerinde bu bükülmeye en yaygın olarak boyuna dalga modundan enine (kesme) dalga moduna mod dönüşümü gerçekleşir. Bu, yaygın olarak kullanılan açılı ışın muayene tekniklerinin temelidir. Birinci (yavaş) ortamdaki (takoz veya su gibi) geliş açısı arttıkça, metal gibi ikinci (daha hızlı) malzemede kırılan boyuna dalganın açısı artar. Kırılan boyuna dalga açısı 90 dereceye yaklaştıkça, dalga enerjisinin giderek daha büyük bir kısmı, Snell yasası tarafından öngörülen açıda kırılan daha düşük hızlı bir enine dalgaya dönüştürülür. 90 derecelik kırılmış boyuna dalga oluşturacak olan daha yüksek geliş açılarında, kırılan dalga tamamen enine modunda bulunur. Daha da yüksek bir geliş açısı, enine dalganın teorik olarak 90 derecede kırıldığı ve bu noktada ikinci malzemede bir yüzey dalgasının oluştuğu bir duruma yol açar [22].

1.8.4. Ultrasonik Dönüştürücüler

Kusur tespiti için kullanılan ultrasonik dalgalar, elektrik sinyallerini ses dalgalarına ve ses dalgalarını elektrik enerjisine dönüştüren ultrasonik dönüştürücüler adı verilen küçük problar tarafından üretilir ve alınır. Kusur tespiti için dönüştürücüler çok çeşitli boyutlarda, frekanslarda ve geometrik şekillerde gelir ancak çoğu ortak bir iç yapıya sahiptir. Dönüştürücünün aktif elemanı, elektrik enerjisini mekanik enerjiye (ultrasonik

titreşimler) dönüştüren ince bir disk, kare veya dikdörtgen piezoelektrik seramik veya piezokompozitten oluşur. Bir elektrik sinyali ile uyarıldığında ses dalgaları üretir ve geri dönen yankılarla titreştiğinde bir voltaj üretir. Kristal olarak da adlandırılan aktif eleman, bir aşınma plakası veya akustik lens ile korunur ve ses darbesi oluşturulduktan sonra dönüştürücüyü susturan bir sönümleme malzemesi bloğu ile desteklenir [18].

1.8.5. Ultrasonik Dönüştürücünün Temel Özellikleri

Geleneksel boyuna dalga ultrasonik dönüştürücüler, yüksek frekanslı mekanik titreşimlerin veya ses dalgalarının piston kaynağı olarak çalışır. Voltaj uygulandığında, piezoelektrik dönüştürücü eleman (genellikle kristal olarak adlandırılır) yüzüne dik yönde sıkıştırarak deforme olur. Voltaj kaldırıldığında, bir mikrosaniyeden daha kısa bir süre sonra, eleman geri yaylanarak bir ultrasonik dalga içeren mekanik enerji darbesi üretir. Benzer şekilde, eleman gelen bir ultrasonik dalganın basıncıyla sıkıştırılırsa yüzlerinde bir voltaj üretir. Böylece tek bir piezoelektrik eleman, ultrasonik darbelerin hem vericisi hem de alıcısı olarak hareket edebilir [22].

Ultrasonik NDT için en yaygın olarak kullanılan türden tüm dönüştürücüler aşağıdaki temel işlevsel özelliklere sahiptir:

a. Tip

Dönüştürücü; temas, gecikme hattı, açılı ışın veya daldırma tipi olarak işleve göre tanımlanır. İncelenen malzeme özelliklerinin (yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık, erişilebilirliğin yanı sıra malzeme içindeki bir kusurun konumu ve inceleme hızı gibi) tümü dönüştürücü tipinin seçimini etkiler.

b. Boy

Normalde biraz daha büyük bir kutuda bulunan aktif dönüştürücü elemanın çapı veya uzunluğu ve genişliği olarak tanımlanır.

c. Frekans

Normalde kilohertz (kHz) veya megahertz (MHz) olarak ifade edilen, bir saniyede tamamlanan dalga döngülerinin sayısı olarak tanımlanır. Endüstriyel ultrasonik testlerin çoğu 500 kHz ila 20 MHz frekans aralığında yapılır bu nedenle çoğu dönüştürücü bu aralıkta kalır ancak ticari dönüştürücüler 50 kHz'den 200 MHz'e kadar mevcuttur. Daha

düşük bir frekansla penetrasyon artarken, çözünürlük ve odak netliği daha yüksek bir frekansla artar.

d. Bant genişliği

Frekans yanıtının belirtilen genlik sınırları içinde kalan kısmı. Bu bağlamda; tipik NDT dönüştürücülerinin tek bir saf frekansta değil, daha ziyade nominal frekans atamasında ortalanmış bir frekans aralığında ses dalgaları ürettiğine dikkat edilmelidir. Endüstri standardı, bu bant genişliğini –6 dB (veya yarım genlik) noktasında belirtmektir.

e. Dalga şekli süresi

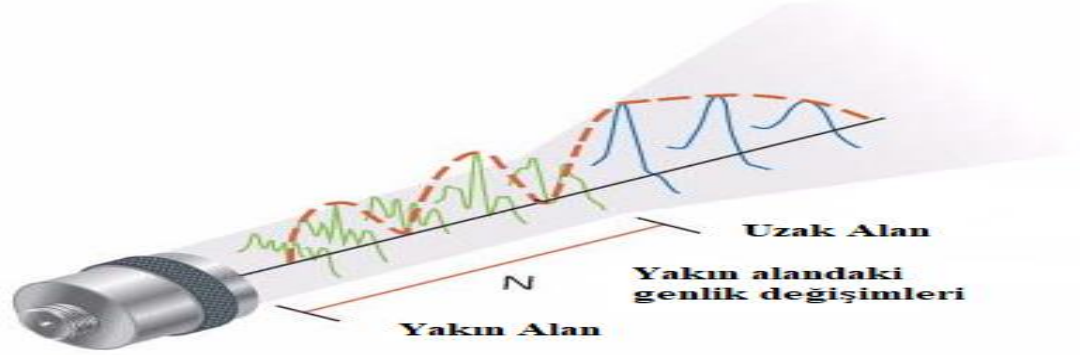
Dönüştürücü tarafından her darbelendiğinde üretilen dalga döngülerinin sayısı olarak tanımlanır. Dar bant genişliğine sahip bir dönüştürücü, daha geniş bant genişliğine sahip bir dönüştürücüden daha fazla döngüye sahiptir. Eleman çapı, destek malzemesi, elektrik ayarı ve dönüştürücü uyarma yönteminin tümü dalga şekli süresini etkiler.

f. Duyarlılık

Uyarma darbesinin genliği ile belirlenmiş bir hedeften alınan yankının genliği arasındaki ilişki olarak tanımlanır.

g. Işın profili

Odaklanmamış bir disk dönüştürücüden gelen ışın olarak tanımlanabilir. Genellikle, çapı genişleyen ve sonunda dağılan aktif eleman alanından kaynaklanan bir enerji sütunu olarak düşünülür. Bir dönüştürücünün ses alanı, yakın alan ve uzak alan olmak üzere iki bölgeye ayrılır. Yakın alan, ses basıncının bir dizi maksimum ve minimumdan geçtiği dönüştürücüye yakın bölgedir ve yüzeyden N mesafesinde son eksende maksimumda biter. Yakın alan mesafesi N, dönüştürücünün doğal odağını temsil eder [22].



Şekil 1.14. Bir dönüştürücünün ses alanı [22]

Uzak alan; N'nin ötesinde, ışın çapı genişledikçe ve enerjisi dağıldıkça ses basıncının kademeli olarak sıfıra düştüğü bölgedir. Yakın alan mesafesi, dönüştürücünün frekansının, eleman boyutunun ve test ortamındaki ses hızının bir fonksiyonudur ve faz dizi testinde yaygın olarak bulunan kare veya dikdörtgen elemanlar için aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$N = \frac{kL^2 f}{4c} \quad \text{veya } N = \frac{kL^2}{4\lambda} \tag{1.6.}$$

Burada; N değeri yakın alan uzunluğu, k değeri en boy oranı sabiti, L değeri eleman veya açıklık uzunluğu, f değeri frekans, c değeri test malzemesindeki ses hızı ve λ değeri dalga boyunu temsil etmektedir. Dairesel elemanlarda k kullanılmaz ve uzunluk terimi yerine elemanın (D) çapı kullanılır. Dairesel elemanlar için yakın alan değeri aşağıdaki formülde gösterildiği gibidir.

$$N = \frac{D^2 f}{4c} \text{ veya } N = \frac{D^2}{4\lambda} \tag{1.7.}$$

1.8.6. Ultrasonik Bağlayıcılar

Ultrasonik bağlayıcılar (couplant), ses enerjisinin dönüştürücü ile test parçası arasında iletimini kolaylaştırmak için neredeyse tüm temas testi uygulamalarında kullanılır. Kuplantlar; tipik olarak orta derecede viskoz, toksik olmayan sıvılar, jeller veya macunlar olacaktır. UT için tipik olarak kullanılan ultrasonik frekanslardaki ses enerjisi hava yoluyla etkin bir şekilde iletilmediği için bunların kullanımı gereklidir. Dönüştürücü ile test parçası arasındaki son derece ince hava boşluğu bile verimli ses enerjisi iletimini önleyecek ve geleneksel testi imkânsız hale getirecektir. Su, motor yağı, gres gibi bir dizi yaygın madde ve hatta saç jölesi gibi bazı ticari ürünler ultrasonik bağlayıcılar olarak kullanılabilir. Yüksek sıcaklık testleri ve düşük halojen içeriği gibi özel kimyanın gerekli olduğu durumlarda özel bağlayıcılar kullanılır [22].

2. BÖLÜM

FAZ DİZİ ULTRASONİK TEST

Dalgaların yapıcı ve yıkıcı etkileşimi ilkesi, İngiliz bilim adamı Thomas Young tarafından 1801'de girişim desenleri oluşturmak için iki nokta ışık kaynağı kullanan dikkate değer bir deneyde gösterildi. Faz içinde birleşen dalgalar birbirini güçlendirirken, faz dışı birleşen dalgalar birbirini iptal eder. Faz kaydırma veya fazlama, sırayla, iki veya daha fazla kaynaktan kaynaklanan zaman kaydırmalı dalga cepheleri ile bu etkileşimleri kontrol etmenin bir yoludur. Bir dalga cephesinin enerjisini bükmek, yönlendirmek veya odaklamak için kullanılabilir. 1960'larda araştırmacılar, bu kontrollü girişim desenleri aracılığıyla ses ışınlarını yönlendirmek için darbeli çoklu nokta kaynaklı dönüştürücüler kullanan ultrasonik faz dizi sistemleri geliştirmeye başladılar. İç organların ayrıntılı kesit resimlerini oluşturmak için yüksek frekanslı ses dalgalarının kullanıldığı ultrasonik görüntülemenin tıbbi uygulamalarına aşinayızdır. Örneğin 1970'lerin başında, tıbbi tanı amaçlı ticari faz dizi sistemleri, ilk olarak insan vücudunun enine kesit görüntülerini oluşturmak için yönlendirilmiş ışınlar kullanılarak ortaya çıktı. Başlangıçta ultrasonik faz dizi sistemlerinin kullanımı; insan vücudunun öngörülebilir bileşimi ve yapısı sayesinde cihaz tasarımını ve görüntü yorumlamasını nispeten basit hale getirmesi gerçeğinin yardımıyla büyük ölçüde tıbbi alanla sınırlıydı. Tıbbi sonogramlar yaygın olarak, faz dizi ve bunlara eşlik eden donanım ve yazılım olarak bilinen özel çok elemanlı problarla yapılır. İlerleyen yıllarda ultrasonik faz dizi teknolojisinin uygulamaları tıbbi teşhis ile sınırlı kalmamıştır. Öte yandan endüstriyel uygulamalarda; metallerin, kompozitlerin, seramiklerin, plastiklerin ve cam elyafın geniş ölçüde değişen akustik özelliklerinin yanı sıra endüstriyel testler kapsamında karşılaşılan çok çeşitli kalınlıklar ve geometriler nedeniyle çok daha büyük bir zorluk ortaya çıkmıştır. Faz dizi ultrasonik teknoloji, 1980'lerin başında tıp alanından sanayi sektörüne geçti. 1980'lerin ortalarında, karmaşık şekilli faz dizili problar üretmek için piezokompozit malzemeler geliştirildi ve kullanıma sunuldu. 1980'lerde tanıtılan ilk endüstriyel faz dizi sistemleri son derece büyüktü ve işleme ve görüntü sunumunu yapmak için bir bilgisayara veri aktarımı gerektiriyordu. Bu

sistemler genellikle kesintisiz enerji üretimi denetimleri için kullanılmıştır. Büyük ölçüde, bu teknoloji; kritik değerlendirmenin, tespit olasılığını artırmak için en son teknolojilerin kullanılmasına büyük ölçüde izin verilen nükleer pazarda yoğun bir şekilde ilgi gördü [22-23].

1990'ların başında, faz dizi teknolojisi, ultrasonik el kitaplarında ve mühendisler için eğitim kılavuzlarında yeni bir NDE (tahribatsız değerlendirme) yöntemi olarak dahil edildi. 1985'ten 1992'ye kadar olan uygulamaların çoğu, nükleer basınçlı kaplar (nozullar), büyük dövme milleri ve düşük basınçlı türbin bileşenleri ile ilgiliydi. Piezokompozit teknolojisi; mikro işleme, mikro elektronik ve bilgi işlem gücündeki (prob tasarımı ve ışın-bileşen etkileşimi için simülasyon paketleri dahil) yeni gelişmeler, 1990'ların sonunda faz dizi teknolojisinin devrim niteliğindeki gelişimine katkıda bulundu. Bilgisayar yetenekleri arttıkça fonksiyonel yazılımlar da geliştirildi. Sonraki yıllarda faz dizi sistemleri; kaynak muayenesi, bağ testi, kalınlık profili oluşturma ve çatlak algılamayı içeren yaygın ultrasonik testlerde yeni bilgi düzeyleri ve görselleştirme sağlamak için endüstriyel ortamlarda kullanımı artmıştır. Endüstriyel kullanım için taşınabilir, pille çalışan faz dizi enstrümanlar 2000'lerin başında ortaya çıktı. Analog tasarımlar, ışın yönlendirme için gerekli çok kanallı konfigürasyonları oluşturmak için güç ve alana ihtiyaç duyuyordu. Dijital dünyaya geçiş ve pahalı olmayan gömülü mikroişlemcilerin hızlı gelişimi, yeni nesil faz dizi ekipmanının daha hızlı gelişmesini sağladı. Ayrıca, düşük güçlü elektronik bileşenlerin mevcudiyeti, daha iyi güç tasarrufu sağlayan mimariler ve yüzey montajlı kart tasarımlarının endüstri çapında kullanımı, bu ileri teknolojinin minyatürleştirilmesine yol açtı. Bu, elektronik kuruluma, veri işlemeye, görüntülemeye ve analize tamamen taşınabilir bir cihaz içinde izin veren faz dizi araçlarıyla sonuçlandı ve böylece kapılar endüstriyel sektörde daha yaygın kullanıma açıldı [22-23].

Ultrasonik faz dizi test teknolojisinin ana tasarım fikirleri, Huygens-Fresnel prensibi ve Helmholtz ses basıncı entegrasyon teoremidir [24].

Günümüzde ultrasonik faz dizi teknolojisi, endüstri ve tıbbın farklı sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknolojide çekici olan, analiz edilen örneğin iç yapısının gerçek zamanlı görüntülerini sağlama yeteneğidir. Bu görüntüler incelenen numune içindeki hacimsel veya çatlak benzeri kusurları tespit etmek için kullanılır [25].

Ultrasonik muayene yöntemi malzemenin hacimsel olarak incelenebildiği, kusurların türünün, boyutunun ve konumunun tespit edilebildiği bir yöntemdir. Faz dizi yöntemi de aynı prensipte çalışıyor olsa da bu yöntemde gönderilen ses dalgalarının şeklini ve yönünü kontrol eden bilgisayar yazılımları kullanılarak kusurların daha hassas belirlenmesini sağlayan dinamik odaklama ve gerçek zamanlı görüntüleme mümkün olmaktadır. Faz dizi propları birbirinden bağımsız olarak görev yapan çok sayıda elementten oluşur. Faz dizi yönteminin en önemli özelliği bu bağımsız elementlerin yazılım kontrolü ile uyarılmasıdır [17].

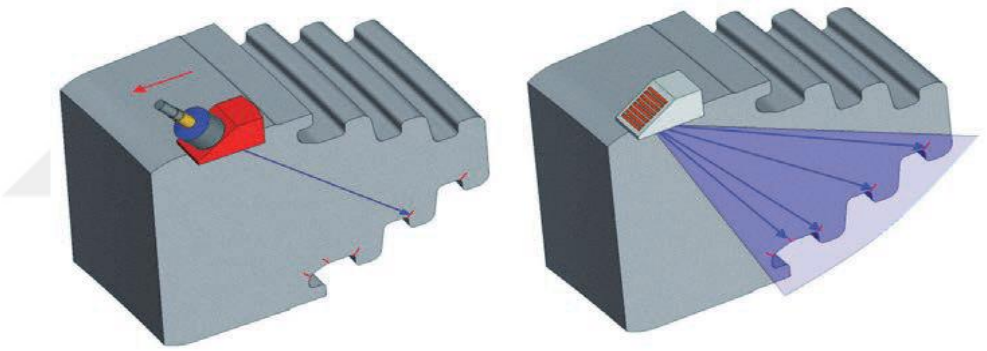
Faz dizi ultrasonik cihazlar, bir test parçasının iç yapısını kontrol etmek veya kalınlığını ölçmek için yüksek frekanslı ses dalgalarını kullanır ve ses dalgası yayılımını yöneten aynı temel fizik yasalarına dayanır. Tek bir prob içinde birden fazla dönüştürücü yolu oluşturma yeteneği, algılamada güçlü bir avantaj sağlar ve doğal olarak incelenen bölgenin bir görüntüsünü oluşturarak incelemeyi görselleştirme yeteneğini artırır. Faz dizi görüntüleme, kullanıcıya kusuru ayırt etme ve boyutlandırmaya yardımcı olabilecek göreli noktadan noktaya değişiklikleri ve çok açılı kusur yanıtlarını görme yeteneği sağlar [26].

Faz dizi; geleneksel tek elemanlı problardan daha sağlam ve kullanımı daha kolaydır, gelişmiş verimlilik sağlar, aynı anda yüzlerce sinyali yakalar ve yanlış alarmların sayısını azaltır. Faz dizi ultrasonik test; kalıcı bir kayıt sağlar, radyasyon üretmez ve çeşitli uygulamalar için kullanılabilir. PAUT, bir kaynağın yüzeyindeki ve hacmindeki kusurları algılayabildiğinden, aynı zamanda bir kusurun yanal konumu (derinlik ve yükseklik) hakkında da bilgi verir [27].

Tahribatsız muayene (NDT) uygulamaları için faz dizi ultrasonik teknolojisi; genel ve özel güç üretimi, uzay, savunma, petrokimya ve imalat gibi endüstrilerde ortaya çıkan muayene gereksinimleri sonucunda gelişimi hızlanmıştır. Bu gereksinimler; hız, esneklik, elektronik kurulum kolaylığı, küçük prob boyutları, geometrik olarak karmaşık parçaların denetiminde kolaylık, güvenilir kusur tespiti ve görüntüleme kolaylığıdır. Faz dizi ultrasonik testin kullanım alanları; kaynak kontrolleri, kalınlık ölçümleri, çatlak kontrolü, korozyon kontrolü, demiryolu araçları tekerlek ve akslarının muayenesi ve basınçlı kaplardır [23].

2.1. Faz Dizi Sistemi

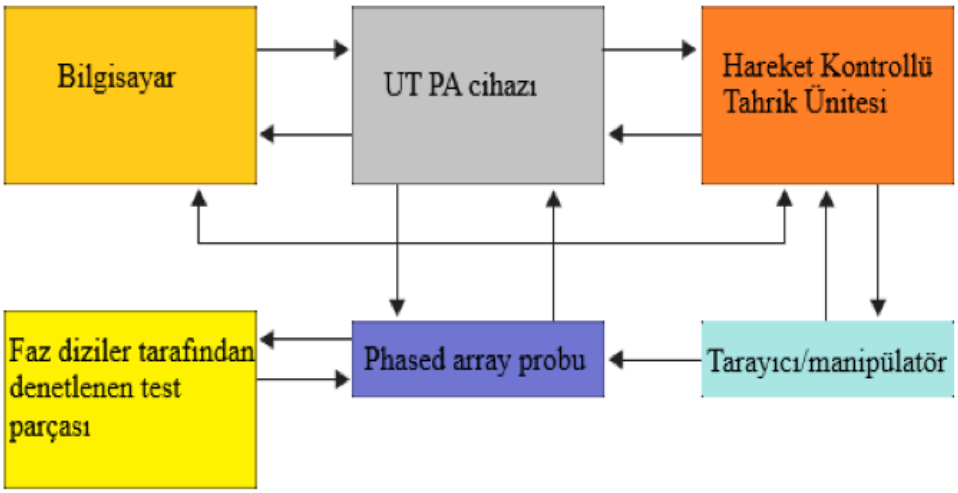
Ultrasonik dalgalar, bir elektrik voltajı tarafından uyarılan piezokristal prob tarafından elastik bir ortamda (test parçası) indüklenen mekanik titreşimlerdir. Ultrasonik dalgaların tipik frekansları 0,1 MHz ila 50 MHz aralığındadır. Çoğu endüstriyel uygulama, 0,5 MHz ile 15 MHz arasındaki frekansları gerektirir. Geleneksel ultrasonik incelemeler, farklı ışınlara sahip monokristal probları kullanır. Bazı durumlarda, ölü bölgeyi azaltmak ve kusur çözünürlüğünü artırmak için çift elemanlı problar veya odaklanmış lensli monokristaller kullanılır. Her durumda; ultrasonik alan, tek bir kırılma açısı ile akustik bir eksen boyunca yayılır. Aşağıdaki sol taraftaki şekilde gösterilen monokristal tek açılı inceleme; çok açılı taramalar ve prob hareketi gerektirir. Sağ tarafta gösterilen şekilde ise faz dizi probu; odaklanmış ışını, prob hareketi olmadan bileşenin uygun bölgesi boyunca tarayabilir [23].



Şekil 2.1 Karmaşık bir geometri bileşeni üzerinde faz dizi ultrasonik teknolojisinin uygulama örneği [23]

NDT için geleneksel ultrasonik dönüştürücüler genellikle ya yüksek frekanslı ses dalgaları üreten ve alan tek bir aktif elemandan ya da biri iletmek ve diğeri almak için olmak üzere iki eşleştirilmiş elemandan oluşur. Faz dizi problar ise tipik olarak, her biri ayrı olarak darbelenebilen 16 ila 256 kadar küçük bireysel elemana sahip bir dönüştürücü düzeneğinden oluşur. Bunlar bir şerit (doğrusal dizi), 2D matris, bir halka (halka dizisi), dairesel bir matris (dairesel dizi) veya daha karmaşık bir şekilde düzenlenebilir. Geleneksel dönüştürücülerde olduğu gibi, faz dizili problar, doğrudan temaslı kullanım için, bir takoz ile bir açı demeti tertibatının parçası olarak veya bir su yolu üzerinden ses kuplajıyla daldırma kullanımı için tasarlanabilir. Dönüştürücü frekansları en yaygın olarak 2 MHz ila 10 MHz aralığındadır. Faz dizi sistemi ayrıca çok elemanlı probu çalıştırabilen, geri dönen ekoları alıp sayısallaştırabilen ve bu eko bilgisini çeşitli standart

formatlarda çizebilen karmaşık bir bilgisayar tabanlı alet içerir [15]. Faz dizi cihazları ile temel bir tarama sistemi için gerekli olan ana bileşenler Şekil 2.2'de sunulmaktadır.



Şekil 2.2. Faz dizi sisteminin temel bileşenleri ve aralarındaki bağlantı [23]

Faz dizi ultrasonik teknolojinin ana özelliği, çok elemanlı bir probdaki ayrı elemanların bilgisayar kontrollü uyarılmasıdır. Piezokompozit elemanların uyarılması; yazılım aracılığıyla açı, odak mesafesi ve odak noktası boyutu gibi tanımlanmış parametrelere sahip ışınlar üretebilir [23].

2.2. Ultrasonik Fazlama

En temel anlamda bir faz dizi sistemi, fazlamanın dalga fiziği ilkesini kullanır. Bir dizi giden ultrasonik darbe arasındaki süreyi, dizideki her bir eleman tarafından üretilen bireysel dalga cephelerinin birbiriyle birleşeceği şekilde değiştirir. Bu eylem, ses ışınını etkili bir şekilde yönlendiren ve şekillendiren öngörülebilir şekillerde enerji ekler veya enerjiyi iptal eder. Bu, ayrı prob elemanlarının biraz farklı zamanlarda darbe göndermesiyle gerçekleştirilir. Açıklığı artırarak etkin hassasiyeti geliştirmek için, elemanlar sıklıkla 4 ila 32'lik gruplar halinde darbelenir bu da istenmeyen ışın yayılmasını azaltır ve daha keskin odaklanmayı sağlar. Odak kuralı hesaplayıcısı olarak bilinen yazılım, test malzemesinin geometrisi ve akustik özelliklerinin yanı sıra prob ve takoz özelliklerini de hesaba katarak, istenen ışın şeklini oluşturmak için her bir eleman grubunu ateşlemek için belirli gecikme süreleri belirler. Cihazın işletim yazılımı tarafından seçilen programlanmış darbe dizisi daha sonra test materyalinde bir dizi

bağımsız dalga cephesi başlatır. Bu dalga cepheleri, sırayla, test malzemesi boyunca ilerleyen ve çatlakları, süreksizlikleri, arka duvarları ve geleneksel bir ultrasonik dalga gibi diğer malzeme sınırlarını yansıtan tek bir birincil dalga cephesinde yapıcı ve yıkıcı bir şekilde birleşir. Işın; çeşitli açılar, odak mesafeleri ve odak noktası boyutları boyunca dinamik olarak yönlendirilebilir böylece tek bir prob tertibatı, test malzemesini bir dizi farklı perspektifte inceleme yeteneğine sahiptir. Bu ışın yönlendirmesi çok hızlı bir şekilde gerçekleşir, böylece birden çok açıdan veya birden çok odak derinliğiyle bir tarama saniyenin çok kısa bir bölümünde gerçekleştirilebilir. Geri dönen yankılar, çeşitli elemanlar veya eleman grupları tarafından alınır ve değişen takoz gecikmelerini telafi etmek için gerektiğinde zaman kaydırılır ve ardından toplanır. Alanına çarpan tüm ışın bileşenlerinin etkilerini etkin bir şekilde birleştiren geleneksel tek elemanlı dönüştürücünün aksine, faz dizi probu, geri dönen dalga cephesini her bir elemandaki varış zamanına ve genliğine göre uzaysal olarak sıralayabilir. Cihaz yazılımı tarafından işlendiğinde, döndürülen her odak kuralı, ışının belirli bir açısal bileşeninden, doğrusal bir yol boyunca belirli bir noktadan ve/veya belirli bir odak derinliğinden yansımadan yansımayı temsil eder. Yankı bilgisi daha sonra çeşitli formatlardan herhangi birinde görüntülenebilir [22].

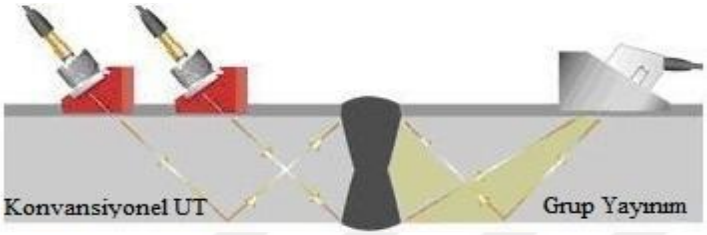
2.3. Faz Dizi Probları

NDT için bir ultrasonik dizinin en basit biçimi, denetim kapsamını ve/veya belirli bir denetimin hızını artıracak şekilde düzenlenmiş birkaç tek elemanlı dönüştürücü dizisi olacaktır. Bunun örnekleri şunları içerir;

- Hem çatlak tespiti hem laminer kusurların bulunması hem de genel kalınlık ölçümü için birden fazla probun sıklıkla kullanıldığı boru muayenesi.
- Küçük kusurların bölgesel bir şekilde tespit edilmesini sağlamak için genellikle farklı derinliklere odaklanmış birden fazla prob gerektiren dövme metal parçalar.
- Kompozitlerde laminer kusurların veya metallerde korozyonun tespitini artırmak için bir yüzey boyunca probların doğrusal bir düzenlemesi.

Bu denetimler, her bir kanalı işlemek için uygun darbelere, alıcılara ve geçit mantığına sahip yüksek hızlı, çok kanallı ultrasonik ekipmanın yanı sıra muayene bölgelerini uygun şekilde kurmak için her dönüştürücünün dikkatli bir şekilde sabitlenmesini gerektirir. En basit haliyle bir faz dizi probu, tek bir paketteki bir dizi bağımsız eleman olarak

düşünülebilir. Gerçekte elemanlar geleneksel dönüştürücülerden çok daha küçük olsa da bu elemanlar yönsel olarak kontrol edilebilir dalga cepheleri oluşturmak için bir grup olarak darbelendirilebilir. Bu "elektronik ışın oluşturma", prob hareketi olmadan çok yüksek hızlarda birden fazla inceleme bölgesinin programlanmasına ve analiz edilmesine olanak tanır [22].



Şekil 2.3. Konvansiyonel (geleneksel) prob ile grup yayınım (faz dizi) probu [28]

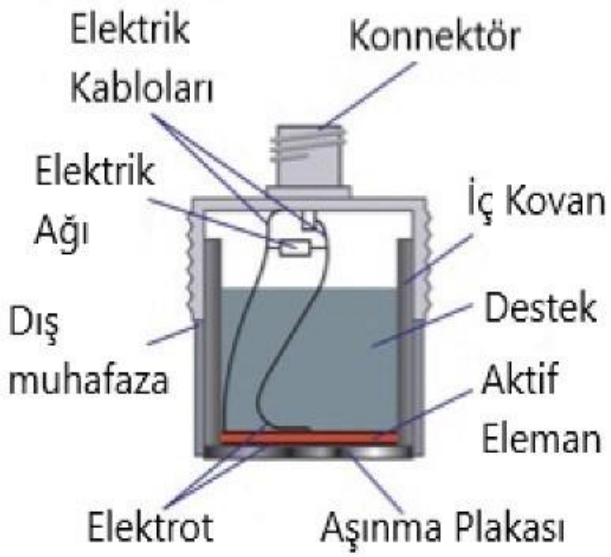
Ultrasonik dalgalar oluşturmak ve almak için tek bir piezoelektrik kristali içeren geleneksel ultrasonik probların aksine, faz dizi problar belirli bir modelde (doğrusal, kare, halka biçiminde veya dairesel) düzenlenmiş birkaç küçük piezoelektrik eleman içerir. Her kristal, faz dizi probunun ultrasonik ışını kolayca yönlendirmesini ve odaklamasını sağlamak için ayrı ayrı uyarılır. PAUT, son yıllarda büyük ölçüde geliştirilmiştir ve verilerin toplanması ve analizi için yeni tekniklerle birlikte çeşitli doğrusal ve matris probları geliştirilmiştir [16].



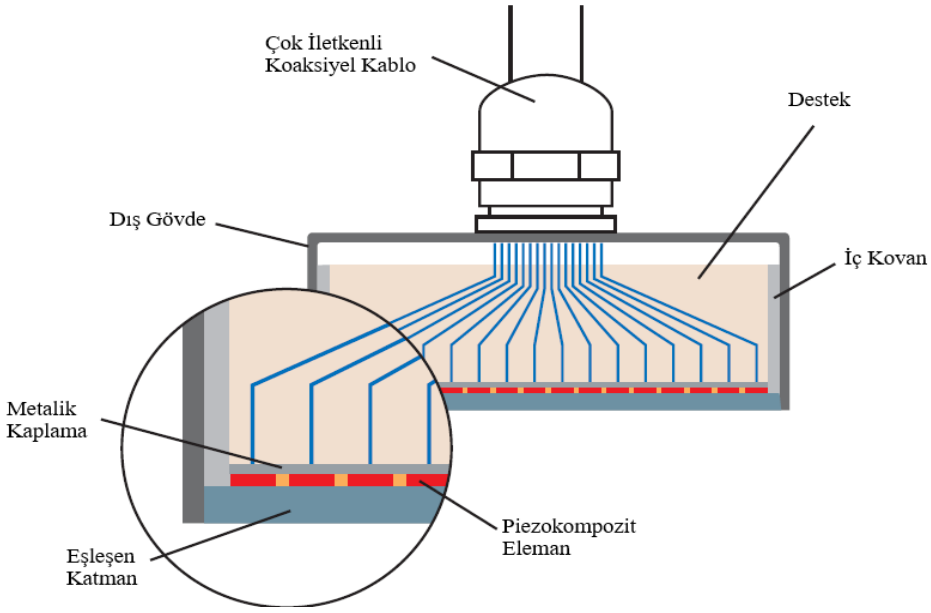
Şekil 2.4. Farklı tipte faz dizili problar [29]

Faz dizi probları çok çeşitli boyutlarda, şekillerde, frekanslarda ve eleman sayısında bulunurken, hepsinin ortak noktası birkaç bölüme ayrılmış bir piezoelektrik elemandır. Endüstriyel NDT uygulamaları için modern faz dizi probları, tipik olarak, bir polimer matrisine gömülü çok sayıda küçük, ince piezoelektrik seramik çubuklardan oluşan piezokompozit malzemeler etrafında inşa edilir. Üretilmeleri daha zor olabilse de kompozit problar tipik olarak benzer tasarıma sahip piezoseramik problara göre 10 dB ila

30 dB hassasiyet avantajı sunar. Segmentli metal kaplama, kompozit şeridi ayrı ayrı darbeli bir dizi elektriksel olarak ayrı elemana bölmek için kullanılır. Bu parçalı eleman daha sonra koruyucu bir eşleştirme katmanı, bir destek, kablo bağlantıları ve bir muhafaza içeren bir prob tertibatına dahil edilir [22]. Geleneksel ultrasonik muayene probu ve faz dizi ultrasonik muayene probu kesitleri aşağıdaki Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Geleneksel ultrasonik muayene probu kesiti [18]



Şekil 2.6. Faz dizi probu kesiti [22]

Faz dizi probları, aşağıdaki temel parametrelere göre işlevsel olarak kategorilere ayrılır:

a. Tip

Faz dizi probların çoğu, plastik takoz veya düz plastik pabuç (sıfır derece takoz) veya gecikme hattı ile kullanım için tasarlanmış açılı ışın tipindedir. Doğrudan temas ve daldırma probları da mevcuttur.

b. Frekans

Çoğu ultrasonik kusur tespiti 2 MHz ile 10 MHz arasında yapılır bu nedenle faz dizi probların çoğu bu aralığa girer. Daha düşük ve daha yüksek frekanslı problar da mevcuttur. Geleneksel dönüştürücülerde olduğu gibi, penetrasyon daha düşük frekansla artarken çözünürlük ve odak netliği daha yüksek frekansla artar.

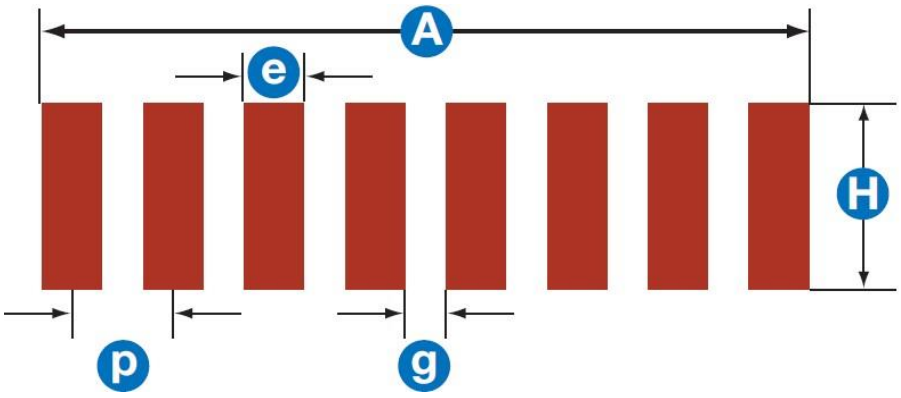
c. Eleman sayısı

Faz dizili problar en yaygın olarak 16 ila 128 elemana sahiptir, bazıları 256'ya kadar sahiptir. Daha fazla sayıda eleman, odaklama ve yönlendirme kabiliyetini arttırır bu da alan kapsamını arttırır ancak hem prob hem de alet maliyetleri artar. Bu öğelerin her biri, ilgilenilen dalga cephesini oluşturmak için ayrı ayrı darbelendirilir. Bu nedenle, bu elemanlar arasındaki boyuta genellikle aktif veya yönlendirme yönü denir.

d. Elemanların boyutu

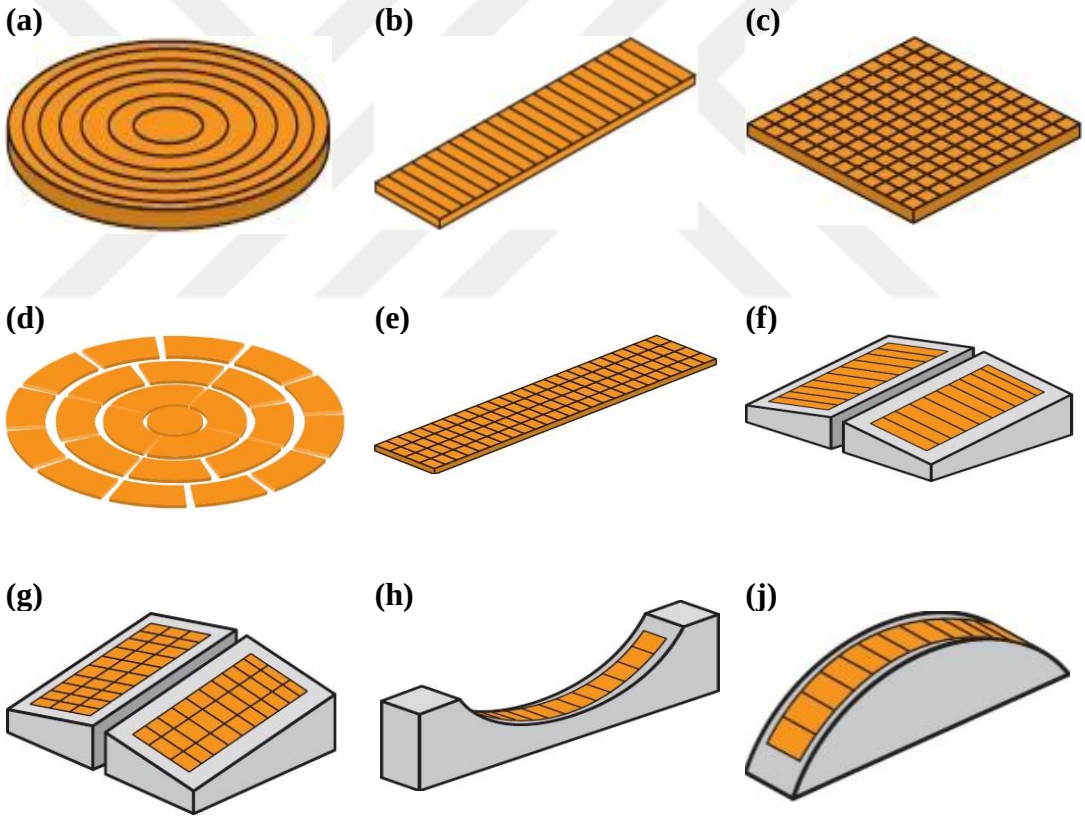
Eleman genişliği küçüldükçe, ışın yönlendirme kabiliyeti artar ancak geniş alan kapsamı, daha yüksek maliyetle daha fazla eleman gerektirir.

Şekil 2.7’de gösterilen faz dizi probunun boyutsal parametreleri olarak; A değeri aktif yönün yönlendirilmesindeki toplam açıklık, H değeri eleman yüksekliği veya yükseltisi, p değeri aralık veya iki ardışık eleman arasındaki merkezden merkeze mesafe, e değeri tek bir elemanın genişliği ve g değeri ise aktif elemanlar arasındaki boşluğu temsil etmektedir.



Şekil 2.7. Faz dizi probunun boyutsal parametreleri [22]

Endüstriyel uygulamalar için kullanılan faz dizi prob türleri Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Faz dizi prob türleri; (a) eşit fresnel yüzeylere sahip dairesel faz dizili problar, (b) 1-D doğrusal faz dizi probu, (c) 2-D matris faz dizi probu, (d) rho-teta (ρ-θ) (parçalara ayrılmış dairesel) faz dizi probu, (e) 1.5-D matris faz dizi probu, (f) çiftli doğrusal faz dizi probu, (g) çiftli 1.5-D faz dizi probu, (h) içbükey faz dizi probu, (j) dışbükey faz dizi probu [29]

2.4. Faz Dizi Takozları

Faz dizi prob tertibatları genellikle bir plastik takoz içerir. Takozlar, düz ışınlı doğrusal taramalar dahil olmak üzere hem enine dalga hem de boyuna dalga uygulamalarında kullanılır. Bu takozlar, temel olarak faz dizi sistemlerinde geleneksel tek elemanlı kusur tespiti ile aynı işlevi yerine getirir. Probdan gelen ses enerjisinin test parçasına bağlanmasını sağlayacak şekilde Snell yasasına göre istenen açıda dönüştürür ve/veya kırar. Faz dizi sistemleri, tek bir takozdan birden çok açıda ışınlar oluşturmak için ışın yönlendirmesini kullanırken bu kırılma etkisi de ışın oluşturma sürecinin bir parçasıdır. Enine dalga takozları, geleneksel dönüştürücülerle kullanılanlara çok benzer ve geleneksel takozlar gibi birçok boyut ve biçimde gelirler. Bazıları tarama uygulamaları için bağlayıcı besleme delikleri içerir. Bazı tipik faz dizi prob takozları aşağıdaki şekilde görülmektedir. Sıfır dereceli takozlar, ses enerjisini birleştirmek ve düz doğrusal taramalarda ve düşük açılı boyuna dalga açılı taramalarda prob yüzünü çizilmelere veya aşınmaya karşı korumak için kullanılan düz plastik bloklardır [22].

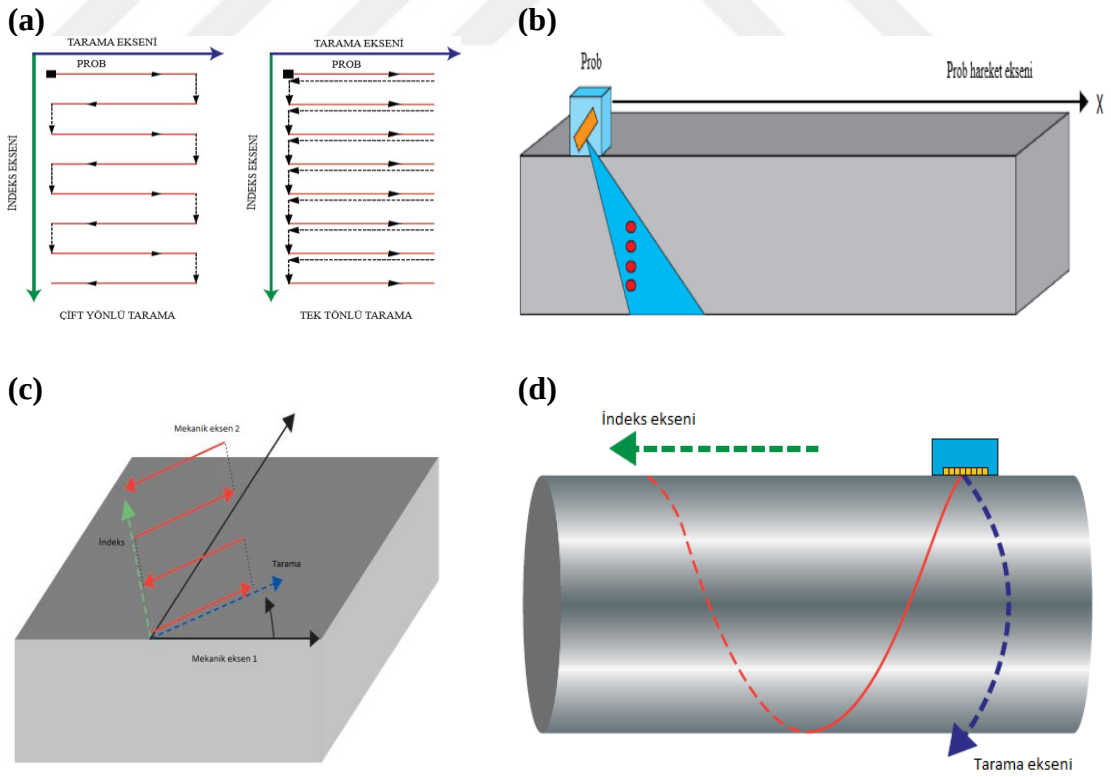


Şekil 2.9. Faz dizi prob takozları [22]

2.5. Tarama Modelleri

Çift yönlü taramada; çift yönlü bir sırayla, veri toplama tarama ekseni boyunca hem ileri hem de geri yönlerde gerçekleştirilir. Tek yönlü taramada; tek yönlü bir sırada, veri toplama yalnızca tarama ekseni boyunca tek yönde gerçekleştirilir. Tarayıcı daha sonra başka bir geçiş için gider. Şekil 2.10 (a) kısmında bulunan kırmızı çizgi, veri alımı yolunu temsil eder. Siyah renkli kesik çizgiler ise veri almadan hareketi temsil eder. Doğrusal tarama tek boyutludur ve doğrusal bir yol boyunca ilerler. Sağlanması gereken ayarlar; hız, tarama ekseni boyunca sınırlar, veri alımları arasındaki boşluktur. Doğrusal taramalar, kaynak muayeneleri ve korozyon haritalama gibi uygulamalar için sıklıkla kullanılır. Doğrusal taramalar, yandan delinmiş deliklere sahip bir referans bloğu üzerinde prob karakterizasyonu için çok kullanışlıdır. Eğik (açısal) tarama dizisi, normal

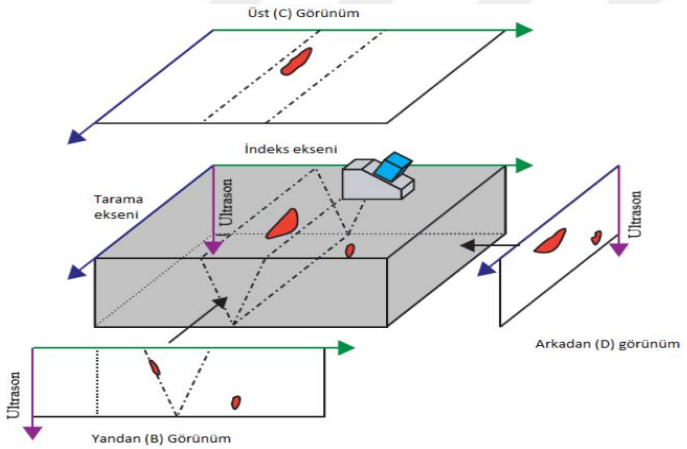
çift yönlü tarama dizisinin bir şeklidir. Bu sıra; tarama ve indeks prob yolunun, tarama ve indeks ekseninde küçük artışlarla oluşturulan yazılım tarafından seçilebilir bir açı ile eğrilmesine izin verir. Silindirik yüzeyleri incelemek için helisel dizi kullanılır. Tarayıcı, silindirin etrafında helisel bir hareket gerçekleştirir. İki bağımsız kodlayıcı diziyi kontrol eder. Tarama ekseni kodlayıcısı silindir etrafındaki sürekli dönüşü kontrol ederken indeks eksen kodlayıcısı silindirin uzunluğu boyunca sürekli hareketi kontrol eder. Silindir etrafındaki her dönüşten sonra tarama ekseni kodlayıcısını sıfır konumuna getirmek için bir senkronizasyon sinyali kullanılabilir. Bu iki hareketin kombinasyonu helezonik bir tarama modeli oluşturacaktır. Aşağıdaki Şekil 2.10 (d) kısmında, kırmızı çizgi veri edinme yolunu temsil eder. Spiral taramada; spiral dizi, disk yüzeyleri gibi dairesel yüzeyleri incelemek için tasarlanmıştır. İnceleme mekanizması dairesel yüzey üzerinde spiral bir hareket gerçekleştirir. İki bağımsız kodlayıcı diziyi kontrol eder. Tarama ekseni kodlayıcısı, yüzey merkezi etrafındaki sürekli dönüşte teta açısını (θ) kontrol eder. İndeks eksen kodlayıcı ise yarıçap boyunca sürekli harekette rho konumunu (ρ) kontrol eder. Her dönüşten sonra tarama ekseni kodlayıcısını sıfırlamak için bir sinyal kullanılabilir [29].



Şekil 2.10. Ultrasonik tarama modelleri; (a) çift yönlü ve tek yönlü tarama, (b) prob karakterizasyonu için doğrusal tarama modeli, (c) eğik (açısal) çift yönlü tarama, (d) silindirik parçalar üzerinde helisel yüzey taraması [29]

2.6. Ultrasonik Görünümler

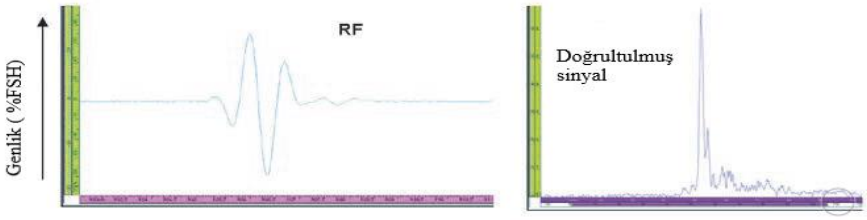
Ultrasonik görünümler, ultrasonik yol (U_{ses}) ve tarama parametreleri (tarama veya indeks ekseni) arasındaki farklı düzlem görünümleriyle tanımlanan görüntülerdir. Aşağıdaki şekilde prob eğim açısı 270°'dir. Prob eğim açısı 0° (veya 180°) ise, yandan görünüm (B-taraması) arkadan görünüm (D-taraması) olur ve bunun tersi de geçerlidir. B-taraması, derinlik ve prob hareket eksenleri tarafından tanımlanır. D-taraması, derinlik ve elektronik tarama ekseni ile tanımlanır. Temel ultrasonik görünümler; A-tarama, B-tarama, C-tarama, D-tarama, S-tarama, polar görünüm, bant grafiği (genlik ve/veya konum), TOFD görüntüsü (B-taramanın özel ölçekli uygulaması) olarak sıralanabilir.



Şekil 2.11. Ultrasonik görünümler (B-taraması, C-taraması ve D-taraması) [29]

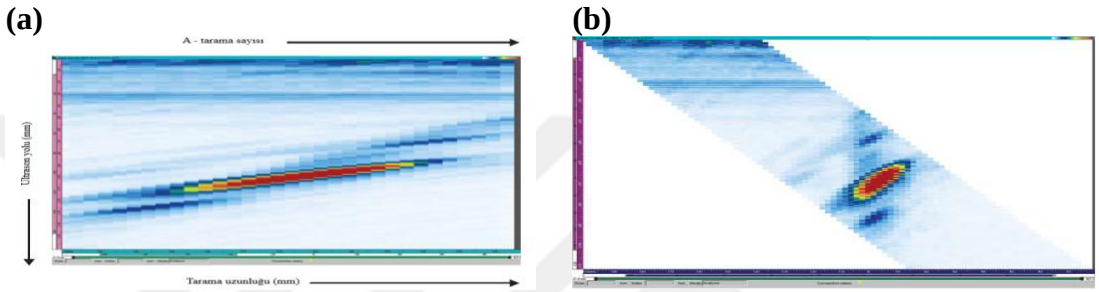
Bir A-taraması, alınan ultrasonik darbe genliğinin tarama eksenine (ultrasonik yol) veya bir dalga biçimine karşı bir temsilidir veya görünümüdür. Bu tür sunumun ana avantajı, süreksizliğin boyutunu ve konumunu belirlemek için kullanılabilecek genliği vermesidir [30].

Bir A-taraması, bir RF (radyo frekansı) veya iki kutuplu doğrultulmuş sinyal olarak görüntülenebilir.



Şekil 2.12. A-tarama gösterimi [29]

B-taraması, kaydedilen ultrason verilerinin 2 boyutlu bir görünümüdür. Genellikle yatay eksen tarama konumudur ve dikey eksen ultrason (U_{ses}) yolu veya zamanıdır. Eksenler, gerekli ekrana bağlı olarak tersine çevrilebilir. Görüntülenen verilerin konumu, alım anındaki kodlayıcı konumlarıyla ilgilidir. Esasen bir B-taraması, bir dizi yığılmış A-taraması veya dalga biçimidir. Ultrasonik yol; kırılma açısı ve gecikme için düzeltilirse B-taraması, yatay eksende tarama uzunluğu ve dikey eksende derinlik ile incelenen parçanın hacim düzeltmeli yan görünümünü temsil edecektir [29].

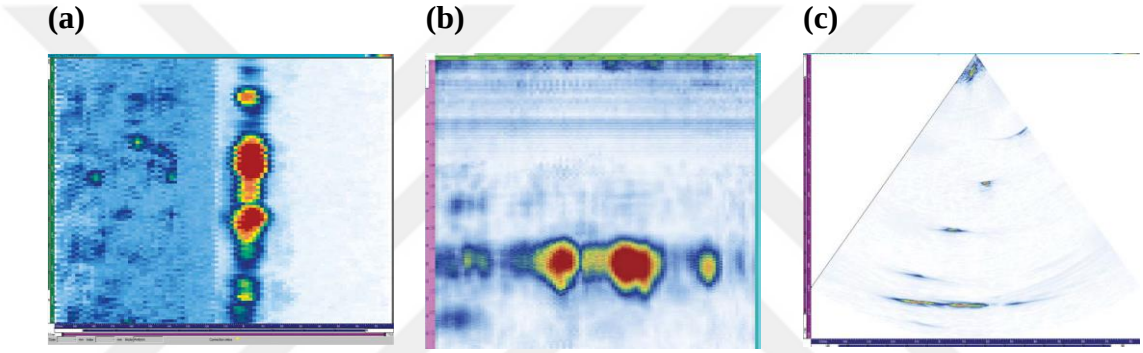


Şekil 2.13. B-tarama gösterimleri; (a) reflektörü gösteren, bileşenin düzeltilmemiş B-taraması (yandan görünüm), (b) kırılan açı için düzeltilmiş B-tarama görünümü [17]

C-taraması, test numunesinin üstten veya plan görünümü olarak görüntülenen ultrasonik verilerin 2 boyutlu görünümüdür. Eksenlerden biri tarama eksenidir diğeri indeks eksenidir. Geleneksel ultrasonik sistemlerde her iki eksen de mekaniktir. Lineer faz dizilerde, bir eksen mekanik diğeri elektroniktir. Görüntülenen verilerin konumu, veri alımı sırasında kodlayıcı konumlarıyla ilgilidir [17]. Ultrasonik C-taramaları; iç kusurların şeklini, boyutunu ve kapsamını belirlemek için en uygun görüntüdür. C-tarama haritalarından numunenin kalınlığı ve yabancı maddenin yeri hakkında derinlemesine bilgi almak mümkündür [3].

D-taraması, verilerin iki boyutlu grafik sunumudur. B-taramasına benzer ancak görünüm B-taramasının dik açısındadır. B-taraması yandan bir görünüm ise D-taraması arkadan bir görünümdür. Hem D taramaları hem de B taramaları, yalnızca önceden tanımlanmış bir derinlikteki verileri gösterecek şekilde geçirilir. Eksenlerden biri indeks ekseni olarak tanımlanır diğeri ultrasonik yoldur (U_{ses}). B-taraması tarama eksenini zamana karşı gösterirken D-taraması indeks eksenini zamana karşı gösterir. Ultrasonik yol, açı ve gecikme için düzeltilirse dikey eksen derinliği temsil eder. Arkadan (D-tarama) görünüm, özellikle kaynaklar için 2 boyutlu kaplama (numune) çizimi kullanılarak veri analizi için çok kullanışlıdır [29].

Bir S-taraması (sektörel veya azimut taraması), gecikme ve kırılma açısı için düzeltilmiş belirli bir kanaldan tüm A-taramalarının 2 boyutlu bir görünümünü temsil eder. Tipik bir S-taraması, aynı odak mesafesini ve öğeleri kullanarak bir dizi açıyı tarar. Yatay eksen, düzeltilmiş bir görüntü için çıkış noktasından öngörülen mesafeye (test parçası genişliği) karşılık gelir ve dikey eksen derinliğe karşılık gelir. S-taramaları, faz dizilere özgüdür ve boyuna dalga veya enine dalga, temas, daldırma veya bir takoza monte edilmiş olabilir. S-taramaları da düzeltilmemiş veya düzeltilmiş olarak görüntülenebilir. Düzeltilmiş S taramaları gerçek reflektör konumlarını gösterir ve görselleştirme ve görüntü karşılaştırmaları için kullanışlıdır [29].



Şekil 2.14. Diğer ultrasonik tarama gösterimleri; (a) üstten (C-tarama) görünüm, (b) arkadan (D) görünüm, (c) S-tarama [29]

3. BÖLÜM

UÇAK YAPILARI VE YAPI KUSURLARI

3.1. Uçak Yapıları

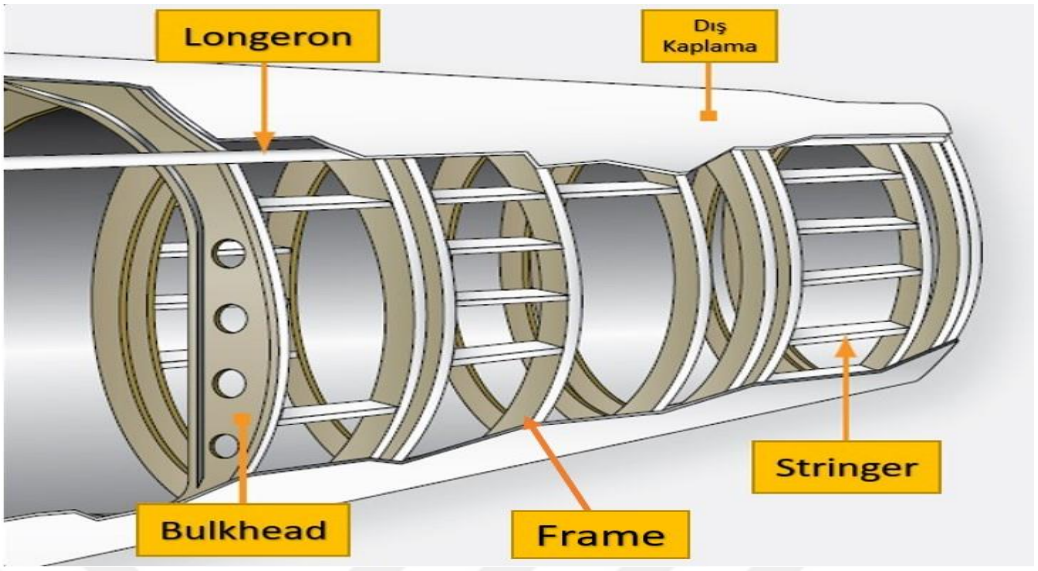
Arızalandığında uçağın kayıp yaşamasına neden olabilecek yapılar olan güvenlik açısından kritik yapılarda kullanılan malzemeler, havacılık ortamında yüksek mekanik özellikler ve mükemmel dayanıklılık gerektirir. Güvenlik açısından kritik yapılara örnek olarak gövde, kanatlar, iniş takımları ve kuyruk takımı verilebilir. Uçak yapılarında kullanılan malzemeler; yüksek sertlik, mukavemet, kırılma tokluğu, yorulma dayanıklılığı ve korozyon direncinin bir kombinasyonunu gerektirir. Havacılık malzemeleri, ucuz ve imalatı kolay olmakla birlikte yapısal ve aerodinamik yükleri taşımalıdır [31].

Uçağın yapısal elemanları bir yükü taşıyacak veya gerilime dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Bir uçağın tasarımında; kanat, gövde, rib, spar ve hatta her metal bağlantı parçası yapıldığı malzemenin fiziksel özelliklerine göre dikkate alınmalıdır. Uçağın her parçası üzerine gelecek yükü taşıyacak şekilde planlanmalıdır. En yaygın uçak sabit kanatlı uçaklardır. Sabit kanatlı bir uçak beş ana yapıdan oluşur. Bunlar; gövde, kanatlar, kuyruk takımı, uçuş kontrol yüzeyleri ve iniş takımıdır [32].

3.1.1. Gövde

Uçakların ana gövdesini ya da genel yapısını teşkil eden üç yapı yöntemi vardır. Bunlar; kafes yapı, monokok yapı ve yarı monokok tip yapı yöntemleridir. Ayrıca gövde yapısında kullanılan elemanların gövde yükünü taşıyan esas yapı elemanlarından olanlara birincil yapı, ana gövde yapı elemanlarının dışındaki ve yardımcı olan yapılara ise ikincil yapı denir. Kafes yapı tarzında, uçak iskeletini genellikle birbirine çapraz olarak kaynak edilmiş çelik borular oluşturur. Bazı tek motorlu uçaklarda uygulanan bu yöntemde hafiflik istendiği zaman yapısal parçalar, alüminyum borular halinde üretilebilir. Monokok tip inşa yönteminde gövde, kalıp halinde imal edilmiş frame (dairesel kiriş-

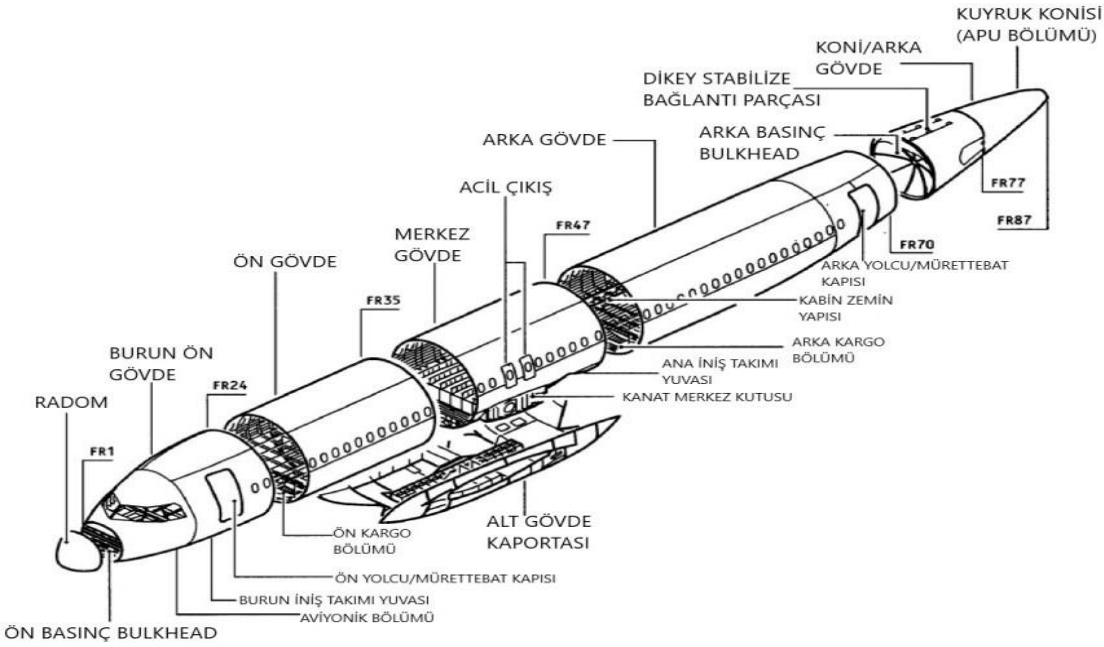
çember), basınç bölmeleri (bulkhead) ve ayrı olarak bağlanan kaplama sacından oluşur. Bu kaplama, ana yükleri üzerinde taşır. Gövde sağlamlığı kaplama malzemesinin nitelikleri ile ilgilidir. Monokok yapılarda stringer ve longeron gibi boylamasına uzanan yapı elemanları kullanılmaz ve gövde sacı doğrudan framelere bağlanır. Dezavantajı gövde sacının yapıyı sarması zordur ve uçuş için stabil ağırlığın temin edilmesi bu tip yapılarda zordur. Yarı monokok tip yapı, günümüz uçaklarında uygulanan en yaygın yapı tarzıdır. Bu inşa yönteminde, bulkhead, frame gibi elemanlarla bunlara ek olarak longeron, keel beam gibi yapısal elemanlar da kullanılır. Stringerlar ise kaplama sacına boylamasına destek olarak gövdenin burulmasını önler. Yarı monokok gövdeler, birçok parçanın imal edilmesi ve sonradan bunların birleştirilmesi ile elde edilir. Yarı monokok yapıda bulunması gereken bazı kalın parçaların ağırlığını azaltmak için, yük taşıyan bölgeler dışındaki yerler kimyasal frezeleme adı verilen yöntemle inceltilir. Modern yolcu uçaklarının tamamında yarı monokok iskelet inşa yöntemi uygulanmaktadır. Bu yöntemde uçak imalatı ve bakım işlemleri kolaydır. Üstelik bu inşa tarzı ile uçak üzerindeki yükler çeşitli elemanlara dağıtıldığı için uçak servis ömrüde uzatılmış olur. Uçak gövdesi yapısal bileşenleri çok çeşitli malzemelerden yapılmıştır. İlk uçaklar öncelikle ahşaptan yapılmıştır. Bunu çelik borular ve en yaygın malzeme olan alüminyum takip etti. Yeni sertifika alan uçakların çoğu, karbon fiber kompozit malzemelerden yapılmıştır. Gövde; kargo, kokpit, yolcu kompartmanı ve diğer ekipmanlar için alan sağlar. Yarı monokok gövde öncelikle alüminyum ve magnezyum alaşımlarından yapılmıştır ancak bazen yüksek sıcaklıktaki bölgelerde çelik ve titanyum da bulunur. Bahsi geçen komponentlerin hiçbiri tek başına uçuş ve iniş sırasında oluşan yükleri taşıyacak kadar güçlü değildir ancak bir araya getirildiğinde bu bileşenler güçlü ve sağlam bir çerçeve oluşturur. Bu; köşebentler, perçinler, somunlar ve cıvatalar, vidalar ve hatta sürtünme karıştırma kaynağıyla gerçekleştirilir. Köşebent, gücü artıran bir tür bağlantı braketidir. Gövdeler genellikle iki veya daha fazla bölüm halinde inşa edilir. Küçük uçaklarda genellikle iki veya üç bölüm halinde yapılırken, daha büyük uçaklar monte edilmeden önce altı veya daha fazla bölümden oluşabilir [32].



Şekil 3.1. Yarı monokok gövde yapısı [32]

Ticari amaçla kullanılan Airbus A320 yolcu uçakları gövdesi yarı monokok bir yapıya sahiptir. Hafif alaşımlı dairesel frameler ve uzunlamasına stringerler ana gövde kaplamasını destekler ve güçlendirir. Burun düzeneğinde uzunlamasına stringerler yoktur. Uçak gövdesi, gövde dış kaplamasının tamamını oluşturmak üzere bir araya getirilen ayrı tertibatlardan oluşur. Bu tertibatlar; burun ön gövde, ön gövde, merkez gövde, arka gövde ve koni/arka gövdedir. 24, 35, 47 ve 70 numaralı frameler, tertibatların bağlantılarını oluşturur. Burun ön gövdesi frame 1'den frame 24'e kadar uzanır. Tertibatın üst kısmı kokpiti ve iki ön yolcu/mürettebat kapısı için giriş alanını içerir. Burun iniş takımı yuvası ve aviyonik bölmesi tertibatın alt kısmına monte edilmiştir. Ön bulkhead frame 1'e monte edilmiştir. Radom frame 1'in ön yüzüne monte edilir. Ön gövde frame 24' ten frame 35' e kadar uzanır. Tertibatın üst kısmı ön kabin alanını içerir. Ön kargo bölmesi tertibatın alt kısmına dahildir. Tertibatın üst ve alt kısımları basınçlı bölgededir. Merkez gövde frame 35'ten frame 47'ye kadar uzanır. Tertibatın üst kısmı, merkez kabin alanını ve frame 38 ile frame 41 arasındaki sol ve sağ kanat acil çıkışlarını içerir. Kanat merkez kutusu ve ana iniş takımı bölmesi, kabin zemininin altındaki alt tertibata monte edilmiştir. Kanat merkez kutusu frame 36 ile frame 42 arasına monte edilir. Ana iniş takımı bölmesi frame 42 ve frame 46 arasına monte edilmiştir. Alt gövdenin altına bir keelbeam yerleştirilmiştir ve frame 35'ten frame 46'ya kadar uzanır. Keelbeam, alt gövdenin uzunlamasına yapısal gücünü korur ve gövde bükülme yüklerini iletir. Arka gövde frame 47'den frame 70'e kadar uzanır. Daha sonra bir araya getirilen iki ayrı alt tertibattan oluşur. İki alt tertibatın bağlantısı frame 64'te yapılır. Komple tertibatın üst

kısmı, arka kabini ve arka yolcu/mürettebat kapılarının giriş alanını içerir. Arka kargo bölmesi tertibatın alt kısmına, frame 46/47 ile frame 65 arasına monte edilir. Koni/arka gövde frame 70'den frame 86'ya kadar uzanır. Tertibat iki ayrı alt tertibattan yapılmıştır. İki alt tertibatın bağlantısı frame 77'de yapılır. İki alt tertibat; koni/arka gövde (frame 70/77) ve kuyruk konisidir (frame 77/86). Her iki alt tertibatın temel yapısı benzerdir. Koni/arka gövde ve kuyruk konisi dış kaplamasını oluşturmak için birbirine perçinlenmiş frame, stringer ve dış kaplama panellerinden yapılmıştır. Arka bulkhead koni/arka gövdede frame 70'e monte edilmiştir. Dikey stabilize bağlantı parçaları frame 70, frame72 ve frame 77'nin üstünde bulunur. Ayarlanabilir yatay stabilize frame 74 ve frame 77 arasına monte edilir. Frame 77'nin arka yüzünde dört adet kuyruk konisi bağlantı parçası bulunmaktadır. Yardımcı güç ünitesi (APU) kuyruk konisine monte edilmiştir. APU bölmesi belirli bir ateş bölgesidir ve bölme duvarları bölmeyi her taraftan kapatır. Bölme duvarları titanyum levhalardan yapılmıştır. Kuyruk konisi uçaktan tek bir ünite olarak çıkarılabilir. Bakım erişim kapakları iki alt tertibatın sağ alt tarafında bulunur. Koni/arka gövde erişim kapağı 314AR, frame 78 ve frame 80 arasına monte edilmiştir. APU erişim kapağı 315AL ve 316AR, frame 80 ve frame 84 arasına monte edilir. Bulkhead ve gövde dış kaplaması temel basınçlı bölgeyi oluşturur. Kokpit, kabin, aviyonik bölmesi ile ön ve arka kargo bölmeleri basınçlı bölgeye dahildir. Radom, kanat merkez kutusu, burun ve ana iniş takım yuvaları, gövde alt kaportası ve koni/arka gövde basınçlı bölgede değildir [33].



Şekil 3.2. Gövde komponent yerleşimleri [33]

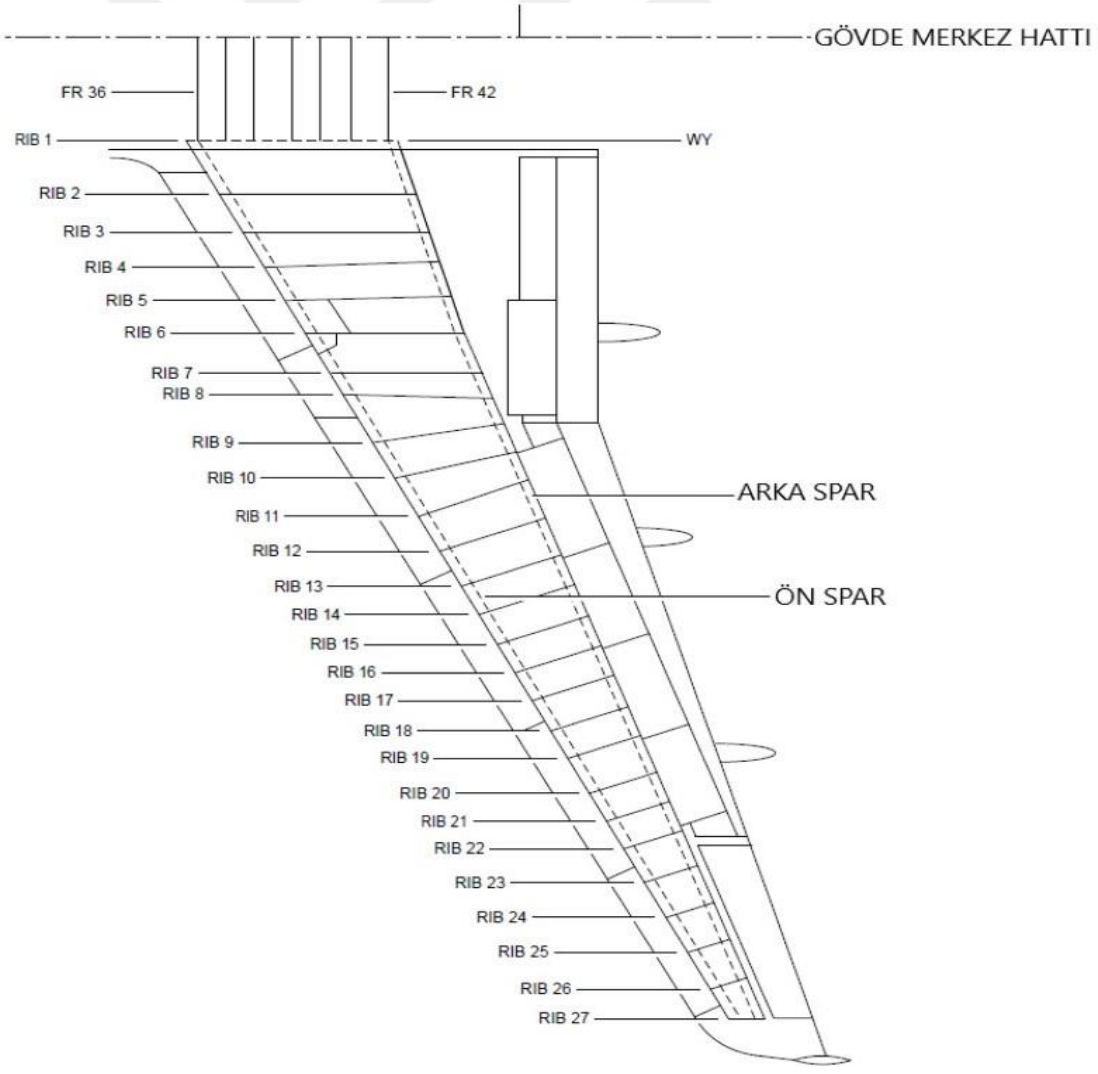
3.1.2. Kanat

Kanadın temel görevi uçuşu sürdürmek için hava yüklerini toplamak ve bu yükleri gövdeye iletmektir. Kanatlar, içten stringerlar ve sparlarla desteklenen ince yüzeylerden yapılmıştır ve bükülme, kesme ve burulma yüklerini taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. Diğer gereksinimler arasında hafiflik, hücum kenarlarında kuş çarpmasına karşı hasar direnci ve dayanıklılık ve uçuş manevrası, türbülans ve sert rüzgarlar nedeniyle değişen yüklerden kaynaklanan hasara ve arızaya karşı direnç gösterecek yüksek yorulma mukavemeti yer almaktadır. Kanatlar alüminyum alaşımı ve/veya karbon-epoksi kompozit kullanılarak yapılmıştır. Kanat kutusu ve kanat bağlantıları, kompozit malzeme veya titanyum alaşımından yapılmış, gövdeye yerleştirilmiş yüksek yüklü yapılardır [31].

Kanatlar, havada hızla hareket ettirildiğinde taşıma kuvveti oluşturan kanat profilleridir. Birçok şekil ve boyutta inşa edilmişlerdir. Kanat tasarımı, arzu edilen belirli uçuş özelliklerini sağlayacak şekilde değişiklik gösterebilir. Kanadın şekli değiştikçe çeşitli çalışma hızlarındaki kontrol, oluşturulan taşıma kuvveti miktarı, denge ve kararlılık da değişir. Kanadın hem hücum kenarı hem de firar kenarı düz veya kavisli olabilir veya bir kenar düz, diğeri kavisli olabilir. Kanadın gövdeyle birleştiği yerde kökten daha uçta daha dar olması için bir veya her iki kenar da konik hale getirilebilir. Kanat ucu kare, yuvarlak ve hatta sivri olabilir. Bir uçağın kanatları gövdeye üstten, gövdenin ortasından veya alttan takılabilir. Gövdenin yatay düzlemine dik olarak uzanabilirler veya hafifçe yukarı veya aşağı açı yapabilirler. Bu açıya kanat dihedral açısı adı verilir. Dihedral açı uçağın yanal kararlılığını etkiler. Kanat yapımında kullanılan en yaygın malzeme alüminyumdur ancak bunlar kumaşla kaplanmış ahşap da olabilmektedir ve bazen magnezyum alaşımı da kullanılır. Modern uçaklar, gövde ve kanat yapımında daha hafif ve daha güçlü malzemelere yönelmektedir. Tamamen karbon fiberden veya diğer kompozit malzemelerden yapılmış kanatların yanı sıra, maksimum güç/ağırlık performansı için malzemelerin birleşiminden yapılmış kanatlar da mevcuttur. Çoğu kanadın iç yapısı, kanadın bir ucundan diğer ucuna uzanan spar ve stringerlar ve hücum kenarından firar kenarına uzanan rib, former ve bulkheadlerden oluşur. Sparlar bir kanadın temel yapısal elemanlarıdır. Tüm dağıtılmış yüklerin yanı sıra gövde, iniş takımı ve motorları da desteklerler. Kanat yapısına bağlı olan dış kaplama, uçuş sırasında oluşan yüklerin bir kısmını taşır. Ayrıca gerilimleri kanat riblerine aktarır. Ribler de yükleri kanat sparlarına aktarır [32].

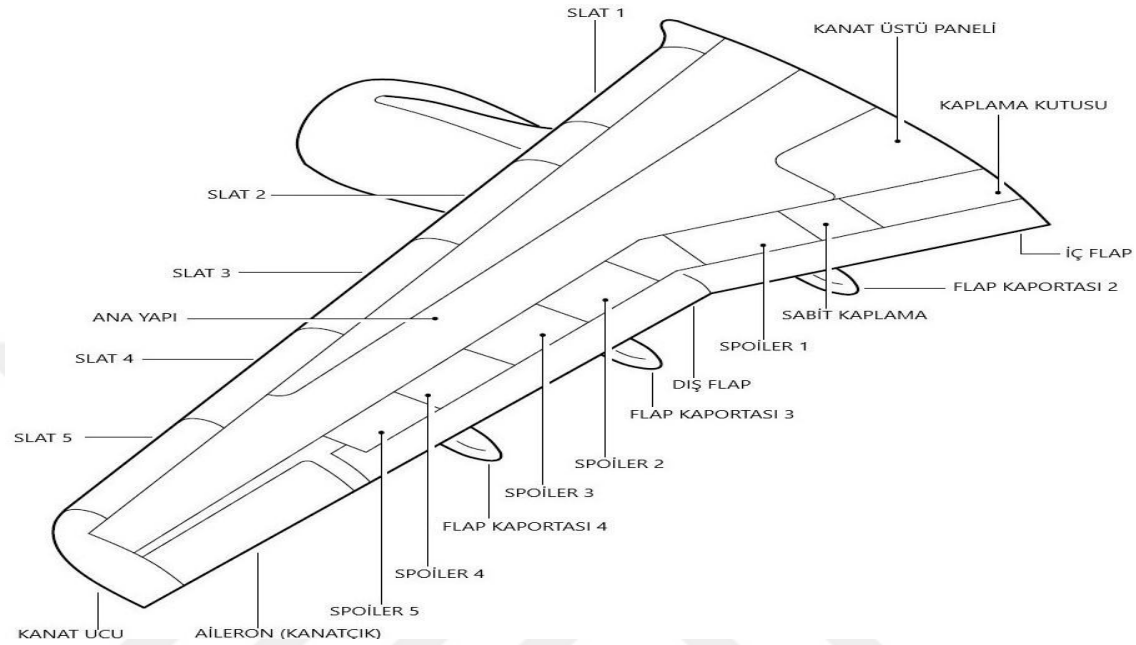
Uçak kanadı, frame 36 ve 42 arasındaki gövdeden geçen sürekli bir yapıdır. Üç parça halinde yapılır; orta kanat (bölge 140), sol dış kanat (bölge 500) ve sağ dış kanat (bölge 600). Orta kanat gövdenin bir parçasıdır ve dış kanatlar için bağlantı noktaları sağlar. Her dış kanadın bir kanat kutusu, hücum ve firar kenarları ve bir sharklet veya kanat ucu vardır. Hücum kenarında slatlar için bağlantı parçaları bulunurken firar kenarında ana iniş takımı, kanatçık (aileron), flap ve spoiler için bağlantı parçaları bulunur. Kanat ucuna bir kanat ucu engel çıkıntıları (fence) takılmıştır. Kanat kutusunda 27 adet rib bulunur. Ribler ön ve arka sparlar arasında bulunur. Kanat kutusunun üst yüzeyinde iki adet dış kaplama paneli, alt yüzeyinde ise üç adet panel bulunur. Kanat panellerinin her biri, ön sparın ilerisine ve arka sparın arkasına uzanır. Hücum ve firar kenar yapıları bu çıkıntılara ve ön ve arka sparlara bağlanır. Stringer üst ve alt dış kaplama panellerine destek verir. Kanat kutusu entegre bir yakıt deposu ve havalandırma dengeleme deposu (vent surge tank) oluşturur. Alt kaplamadaki 21 erişim paneli, yakıt deposuna ve havalandırma dengeleme deposuna erişim sağlar. Kanat kutusunda; hücum kenarı ve mekanizmaları, firar kenarı ve mekanizmaları, kanat ucu ve engel çıkıntıları, motor bağlantısı pylonları ve ana iniş takımı için bağlantılar bulunur. Sharklet veya kanat ucu rib 27'ye takılıdır. Kanat ucu engel çıkıntıları, kanat ucunun dış ucuna bağlanır. Slatlar uçağa doğru taşıma kuvvetini sağlamak için uzatılır veya geri çekilirler. Hücum kenarı mekanizmaları beş slattan oluşur. Slat 1, motor pylonunun iç tarafındadır ve 2'den 5'e kadar olan slatlar, motor pylonunun dış tarafındadır. Hücum kenarı slatları kanat üzerinde rib 2 ile rib 27 arasında bulunmaktadır. Firar kenarı mekanizmaları; iki adet firar kenarı flap, aileron ve beş adet spoilerdan oluşmaktadır. İç ve dış flaplar kanadın hücum kenarına monte edilir. İç flap rib 1 ile rib 9 arasında, dış flap ise rib 9 ile rib 22 arasındadır. Aileron kama şeklinde bir yapıdır ve iç ve dış uç ribler, iç ribler, petek çekirdekli üst ve alt dış kaplamalar ve spar gibi reçine emdirilmiş karbon fiber bileşenlere sahiptir. Aileron, kanadın firar kenarına rib 22 ile rib 27 arasına monte edilir. Aileron, yatış hareketini kontrol etmek için spoiler 2'den spoiler 5'e kadar tüm spoilerler ile uzatılır veya geri çekilir. Her kanadın üst yüzeyinde, firar kenarı flaplarının ilerisine monte edilmiş beş adet spoiler bulunmaktadır. Spoiler 1, bükülme konumunun iç tarafındaki arka ara spara bağlanır. 2'den 5'e kadar olan spoilerler, bükülme konumunun dışında, arka sparın orta ve dış bölümlerine bağlanır. Spoiler 1, rib 5 ve rib 9 arasına takılıdır. Rib 10 ve rib 22 arasında spoiler 2'den spoiler 5'e kadar spoiler takılıdır. Spoiler; yatış hareketi, hız freni ve zemin spoileri işlevleri için uzatılır veya geri çekilir. Spoiler kama şeklindeki yapılardır. Bal peteği çekirdeğe bağlı

karbon fiber üst ve alt dış kaplamaları, yan kısımları ve firar kenarı profili vardır. Alüminyum alaşımlı bağlantı parçaları ve menteşelerle arka spara ve arka ara spara bağlanırlar. Spoiler 1 dört adet işlenmiş alüminyum alaşımlı bağlantı parçası vardır. Bunlar iç, dış ve orta menteşeler ve spoiler aktüatör bağlantı elemanıdır. Aktüatör bağlantı parçası orta menteşenin içine monte edilir. Spoiler, menteşeler aracılığıyla arka ara spara bağlanır. Spoilerin arka kenarına takılan titanyum alaşımlı sürtünme şeridi, iç flap geri çekildiğinde spoilerin hasar görmesini önler. Contalar, spoilerin iç ve dış uçlarına ve hücum kenarı boyunca takılıdır. Spoiler 2, firar kenarının sabit yapısına monte edilmiştir. Bükülme pozisyonunun hemen dışında, orta arka spara bağlanır. Spoiler 3 bağlantıları ve orta menteşe ile orta arka spara bağlanır. Spoiler 4, firar kenarının sabit yapısına monte edilmiştir. Rib 16 ve rib 19 arasındaki dış arka spara bağlanır. Spoiler 5, firar kenarının sabit yapısına monte edilmiştir. Rib 19 ve Rib 22 arasındaki dış arka spara bağlanır [34].



Şekil 3.3. Kanat rib ve spar yerleşimi [34]

Dış kanat ana kutu yapısı ve slatlar yüksek kaliteli alüminyum alaşımlardan yapılmıştır. Aileronlar, flaplar, spoiler ve fairingler karbon fiberle güçlendirilmiş plastikten (CFRP) yapılmıştır. Gerektiğinde titanyum alaşımları ve çelik alaşımları kullanılır [34].



Şekil 3.4. Kanat yapısı [34]

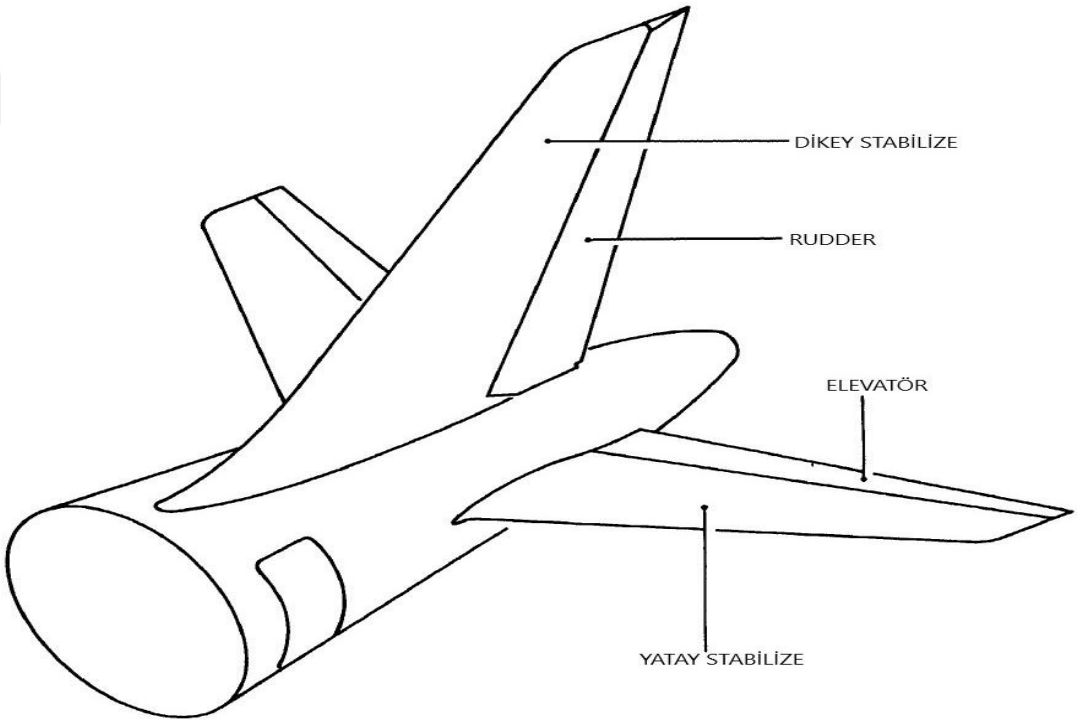
3.1.3. Kuyruk Takımı

Bir uçağın kuyruk takımı aynı zamanda kuyruk bölümü olarak da bilinir. Çoğu kuyruk takımı bir kuyruk konisinden, sabit aerodinamik yüzeylerden veya stabilizelerden ve hareketli aerodinamik yüzeylerden oluşur. Kuyruk konisi çoğu uçak gövdesinin arka ucunu kapatmaya ve düzene sokmaya yarar. Koni, gövdedekine benzer yapısal elemanlardan oluşur ancak koniler, gövdeye göre daha az strese maruz kaldıkları için genellikle daha hafif yapıya sahiptir. Tipik kuyruk takımının diğer bileşenleri kuyruk konisinden daha ağır yapıya sahiptir. Bu elemanlar, uçağın dengede kalmasına yardımcı olan sabit yüzeyleri ve uçuş sırasında uçağın yönlendirilmesine yardımcı olan hareketli yüzeyleri içerir. Sabit yüzeyler yatay stabilize ve dikey stabilizedir. Hareketli yüzeyler genellikle dikey stabilizenin arka kenarında yer alan bir rudder ve yatay stabilizenin arka kenarında yer alan bir elevatördür. Stabilizelerin yapısı kanat yapımında kullanılanlara benzerlik göstermektedir. Kanatta bulunan spar, rib, stringer ve dış kaplama kuyruk takımı yapılarında da mevcuttur. Stabilizeyi şekillendiren ve destekleyen ve gerilimleri aktaran aynı işlevleri yerine getirirler. Uçuş sırasında hava yüklerinin yarattığı bükülme, burulma ve kesme yükleri bir yapı elemanından diğerine geçer. Her üye gerilmenin bir

kısmını absorbe eder ve geri kalanını diğerlerine aktarır. Sonuçta spar, aşırı yükleri gövdeye iletir. Yatay bir stabilize de aynı şekilde inşa edilmiştir. Rudder ve elevatör kuyruk takımının bir parçası olan uçuş kontrol yüzeyleridir [32].

Airbus A320 uçağı kuyruk takımı; dikey stabilize, rudder, ayarlanabilir yatay stabilize ve iki adet elevatörden oluşur. Stabilizenin ana yapısal bileşenleri (spar, rib ve dış kaplama panelleri) CFRP katmanlardan yapılmıştır. Diğer tüm bileşenler aynı malzemeden veya GFRP veya hafif alaşımdan yapılmıştır. Üç bağımsız hidrolik sistem, rudder ve elevatörü kontrol eder. Yatay stabilize ve rudder pozisyonu ayarlanabilirdir. Stabilizeler, tamamen sökülebilirdir. Ayarlanabilir yatay stabilize (THS) gövdenin kuyruk bölümüne monte edilmiştir. Sol ve sağ elevatör için destekleyici yapıya sahiptir. THS, gövdeye üç noktadan bağlanır. Bağlantı noktaları THS aktüatöründe ve gövdenin her iki yanındaki iki menteşe noktasındadır. THS'nin ana yapısal bileşenleri sol ve sağ spar kutuları ve merkez birleşme yeridir. Diğer tüm bileşenler sol ve sağ spar kutularına takılıdır. Bu bileşenler; hücum kenarı, firar kenarı, yatay stabilize uç kısmı ve bağlantı parçalarıdır. THS'nin geliş açısı kontrol edebilir. Hareket aralıkları, burun aşağıya 13,5 derece ve burun yukarıya 4,0 derecedir. THS komple bir ünite olarak sökülebilir. Elevatör uçağa yunuslama hareketi kontrolü sağlar. Elevatör, maksimum 30 derece yukarı ve 15 derece aşağı açıyla hareket ettirilebilir. Her elevatörde bulunan iki adet servo kontrol ünitesi hareketi kontrol etmektedir. Her elevatörün yapısında bir ön spar, bir üst ve bir alt dış kaplama paneli ve dört rib bulunur. Diğer tüm bileşenler ona eklenmiştir. Altı adet menteşe bağlantısı, her bir elevatörü ayarlanabilir yatay stabilizenin spar kutusuna bağlar. Servo kontrol ünitelerine iki bağlantı parçası bağlanır. Dikey stabilize arka gövdeye takılıdır ve rudderı tutar. Rudder, üç servo kontrol ünitesi tarafından çalışmaktadır. Yüksek frekans anteni ve VOR anteni dikey stabilizeye bağlanır. Dikey stabilize tek ünite olarak çıkarılabilir. Dikey stabilizede bir spar kutusu, hücum kenarı, firar kenarı, stabilize uç kısmı ve rudder bulunur. Dikey stabilizenin ana yapısal bileşeni spar kutusudur. CFRP katmanlardan yapılmıştır. Hücum kenarının üç bölümü vardır. Bir petek çekirdeği üzerine GFRP'nin katmanlarından yapılırlar. Firar kenarında her iki tarafta dört erişim paneli ve üç destek frame bulunur. Rudder hidroliğini, servo kontrollerini, rotları ve menteşe bağlantılarını kapsar. Erişim panelleri, petek yapılı bir çekirdek üzerindeki CFRP katmanlardan yapılmıştır. Destek frameleri CFRP'den yapılmıştır. Dikey stabilizenin uç kısmı, petek yapılı bir çekirdek üzerindeki GFRP'nin katmanlarından yapılmıştır. Spar

kutusunun üstüne ve hücum kenarı uç kısmındaki rib yapısına monte edilir. Rudder tek ünite olarak yapılmıştır. Dikey stabilizenin firar kenarındaki menteşe kollarına takılır. Rudder nötr tarafın her iki tarafında 30 dereceye kadar saptırılabilir. Üç servo kontrol ünitesi rudderın sapmasını kontrol eder. Rudder ana yapısı CFRP katmanlardan yapılmıştır. Rudder ana yapısı; bir ön spar, bir üst ve bir alt rib ve iki yan dış kaplamadan oluşur. Yedi rudder bağlantı parçası ve üç aktüatör bağlantı parçası buna eklenmiştir. Rudder'da hafif alaşımdan yapılmış bir uç kısım bulunmaktadır. Havşa başlı vidalar bu uç kısmı rudder ana yapısına bağlar [35].



Şekil 3.5. Kuyruk Takımı [35]

3.1.4. Uçuş Kontrol Yüzeyleri

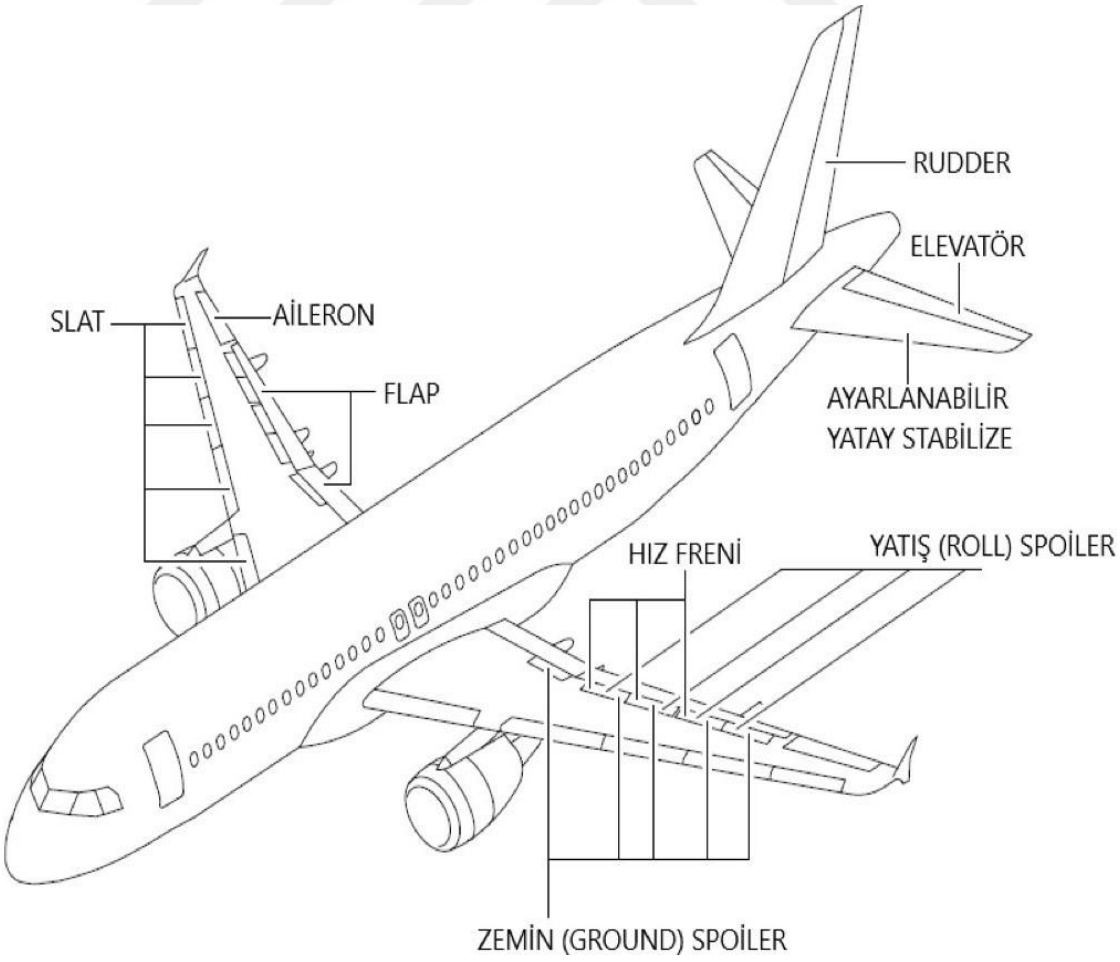
Sabit kanatlı bir uçağın yön kontrolü; enlemesine, uzunlamasına ve dikey eksenler etrafında ve bu eksenler etrafında hareket oluşturacak şekilde tasarlanmış uçuş kontrol yüzeyleri aracılığıyla gerçekleşir. Bu kontrol yüzeyleri; bir uçağın kalkış, uçuş ve iniş sırasında tutumunun kontrol edildiği menteşeli veya hareketli yüzeylerdir. Uçuş kontrol yüzeyleri, ana (birincil) uçuş kontrol yüzeyleri veya yardımcı (ikincil) kontrol yüzeyleri olmak üzere iki temel gruba ayrılırlar. Sabit kanatlı bir uçaktaki birincil uçuş kontrol yüzeyleri; aileron, elevatör ve rudder olmak üzere üç adettir. Aileron, her iki kanadın firar kenarına bağlanır ve hareket ettirildiğinde uçağı uzunlamasına eksen etrafında döndürür.

Elevatör yatay stabilizenin firar kenarına bağlanır. Hareket ettirildiğinde, yatay veya yanal eksene göre uçağın irtifasını değiştirir. Rudder, dikey stabilizenin firar kenarına menteşelidir. Rudder konumu değiştiğinde, uçak dikey eksen etrafında sapma hareketi gerçekleştirir. Uçaklar üzerinde birçok ikincil kontrol yüzeyleri bulunmaktadır. Bu ikincil kontrol yüzeyleri arasında; flap, slat, spoiler, slot ve tab bulunmaktadır. Flaplar genellikle gövdeye bitişik kanatların firar kenarlarının iç kısmında bulunurlar. Kanatların eğimini artırmak ve düşük hızlarda daha fazla taşıma ve kontrol sağlamak için flaplar indirilir. Daha düşük hızlarda inişe olanak tanır ve kalkış ve iniş için gereken pist miktarını kısaltır. Kanat eğimini uzatan bir diğer hücum kenarı kontrol yüzeyi ise slattır. Slatlar, kokpitte bulunan kendi anahtarları ile flaplardan bağımsız olarak çalıştırılabiliyordur. Slatlar yalnızca kanadın hücum kenarından dışarı uzanarak kamberi ve taşıma kuvvetini arttırmakla kalmaz, aynı zamanda çoğunlukla tam olarak açıldığında firar kenarları ile kanadın hücum kenarı arasında bir yarık (slot) bırakır. Bu, kanadın laminer hava akışını koruyacağı hücum açısını arttırır bu da uçağın daha yavaş uçmasına ve kontrolün korunmasına olanak sağlar. Spoiler, birçok ağır ve yüksek performanslı uçağın üst yüzeyinde bulunan bir kontrol yüzeyidir. Açıldığında hava akımına doğru yükselir ve kanadın laminer hava akışını bozarak taşıma kuvvetini azaltır. Spoiler, uçaktaki diğer uçuş kontrol yüzeylerine benzer yapı malzemeleri ve teknikleriyle yapılmıştır. Spoiler kama şeklinde bir yapıdır. Çoğunlukla petek çekirdekli düz panellerdir. Spoilerin üst ve alt dış kaplamaları, yanları ve firar kenarı profili CFRP sandviç yapısından yapılmıştır. Spoiler menteşe bağlantı parçaları ve aktüatör bağlantı parçaları alüminyum alaşımdan yapılmıştır. Düşük hızlarda, uçağın yanal hareketine ve dengesine yardımcı olmak için aileron çalıştığında spoiler çalışacak şekilde donatılmıştır. Aileron yukarı hareket ettirildiğinde spoiler da yükselir. Böylece o kanattaki taşıma kuvveti azalır. Spoiler, hız freni olarak görev yapmak üzere her iki kanatta da tamamen konuşlandırılabilmeleri açısından benzersizdir. Azalan taşıma kuvveti ve artan sürtünme, uçağın uçuş sırasındaki hızını hızlı bir şekilde azaltabilir. Yapım sırasındaki uçuş spoilerlarına benzer özel hız fren panelleri, ağır ve yüksek performanslı uçakların kanatlarının üst yüzeyinde de bulunabilir. Bunlar, konuşlandırıldığında uçağın sürtünmesini artırmak ve hızını azaltmak için özel olarak tasarlanmıştır. Bu hız fren panelleri, düşük hızda aileronlarda farklı şekilde çalışmaz. Kokpitteki hız freni kontrolü, çalıştırıldığında tüm spoiler ve hız freni yüzeylerini tamamen devreye sokabilir. Çoğu zaman bu yüzeyler, motor thrust reverser etkinleştirildiğinde yerde otomatik olarak açılacak şekilde de donatılır. Yüksek

uçuş hızı sırasında havanın bir kontrol yüzeyine uyguladığı kuvvet, bu kontrol yüzeyini saptırılmış konumda hareket ettirmeyi ve tutmayı zorlaştırabilir. Bir kontrol yüzeyi de benzer nedenlerden dolayı çok hassas olabilir. Bu tür sorunlara yardımcı olmak için birkaç farklı tab kullanılır. Uçuş sırasında pilotun ellerini ve ayaklarını kumandalardan çekebilmesi ve uçağın uçuş durumunu muhafaza edebilmesi arzu edilir. Trim tabler buna izin verecek şekilde tasarlanmıştır. Çoğu trim tab, birincil uçuş kontrol yüzeyinin arka kenarında bulunan küçük hareketli yüzeylerdir. Uçuş kontrol yüzeyinin saptırıldığı yönün tersi yönde çıkıntının küçük bir hareketi, havanın çıkıntıya çarpmasına neden olur ve bunun sonucunda uçuş kontrol yüzeyinin istenen pozisyonda tutulmasına yardımcı olan bir kuvvet üretilir. Balance tab, pilot kontrol yüzeyini hareket ettirdiğinde hareket eder. Yüzey bağlantısını kontrol etmek için bağlanmıştır. Pilotun kontrol yüzeyini hareket ettirmek için gereken kuvvetin üstesinden gelmesine yardımcı olur. Servo tab, uçuş kontrol giriş cihazına doğrudan bağlıdır. Birincil veya yedek kontrol aracı olabilir. Manuel olarak hareket etmek için çok fazla kuvvet gerektiren kontrol yüzeylerini aerodinamik olarak konumlandırır. Anti-balance veya anti-servo tab, uçuş kontrol giriş cihazına doğrudan bağlıdır. Pilotun uçuş kontrol pozisyonunu değiştirmek için ihtiyaç duyduğu kuvveti arttırır. Uçuş kontrollerinin hassasiyetini ortadan kaldırır [32].

Uçağın yatış ve yunuslama kontrolleri elektriklidir. Her biri uçağı her iki eksende de kontrol edebilen iki farklı tipte dijital bilgisayara (ELAC ve SEC) dayanmaktadır. Yatay stabilize kontrolünün yanı sıra temel sapma kontrolü de hidromekaniktir. Böylece elektrik gücünün geçici olarak tamamen kaybedilmesi durumunda uçağın uçuşta tutulmasını sağlar. Uçağın yatış kontrolü, her kanatta dört spoiler ile desteklenen bir kanat ucu kanatçığı (aileron) ile sağlanır. Aileronlar, kumanda kollarıyla manuel olarak veya otomatik pilot işleviyle otomatik olarak kontrol edilir. Her bir aileron, iki adet ELAC tarafından sinyal verilen ve farklı hidrolik sistemlerden beslenen iki servo kontrol tarafından çalıştırılabilir. Rudder esas olarak sapma kontrolünün elde edilmesine izin verir. Rudder üç servo kontrolcü tarafından çalıştırılır. Uçağın yunuslama hareketi kontrolü, kumanda kollarıyla manuel olarak veya otomatik pilot işlevinde otomatik olarak kontrol edilen, mekanik olarak bağımsız iki elevatör tarafından sağlanır. Her elevatör, dijital bilgisayarlar tarafından sinyal verilen ve farklı hidrolik sistemlerden beslenen iki adet elektrohidrolik servo kontrolcü ile çalıştırılabilir. Yunuslama hareketi ayarı işlevi, normal uçuş sırasında manuel modda veya otopilot işlevinde otomatik olarak veya normal

yer operasyonunda veya uçuş sırasında arıza durumunda el çarklarından manuel olarak ayarlanabilir yatay stabilize tarafından gerçekleştirilir. Kanatta bulunan beş spoiler yüzeyinden; iki ile beşinci yüzeyler arasında roll (yatış) spoiler, iki ile dördüncü yüzeyler arasında hız freni ve tüm yüzeylerde ground (zemin) spoileri bulunmaktadır. Bu yüzeyler; kumanda kollarından (yatış spoiler), hız freni kontrol kolundan (hız freni) manuel olarak veya otomatik pilot ve zemin spoileri işleviyle otomatik olarak kontrol edilir. Her yüzey; yeşil, sarı veya mavi sistemden beslenen ve SEC' den sinyal alan bir servo kontrolcü tarafından kontrol edilir. Bilgisayarlarda farklı işlevlerin kombinasyonu sağlanır. Elektrik kesintisi durumunda ilgili yüzey hidrolik olarak aşağıda tutulur. Hidrolik bir arıza durumunda, yüzeyin yükselmesini önlemek için servo kontrolcü hidrolik olarak tek yönde kilitlenir. Her iki durumda da simetrik yüzeyin kontrolü otomatik olarak engellenir. Uçakta, kalkış ve iniş sırasında taşıma kuvvetini artırmak için dört flap (kanadın her bir firar kenarında iki adet) ve on adet slat (kanadın her bir hücum kenarında beş adet) bulunur. İki adet slat/flap kontrol bilgisayarı flapları izler ve kontrol eder [36].

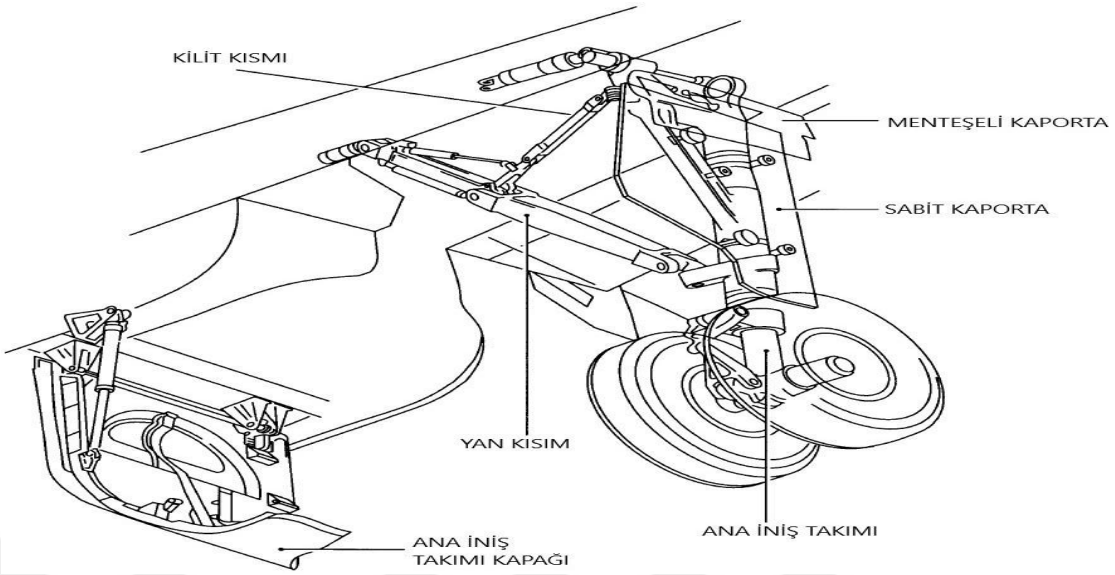


Şekil 3.6. Airbus A320 uçağı uçuş kontrol yüzeyleri [36]

3.1.5. İniş Takımı

Alt takım olarak da adlandırılan iniş takımı; yapısal elemanlar, hidrolik, enerji absorblama kompanentleri, frenler, tekerlekler ve lastiklerden oluşan karmaşık bir sistemdir. İniş takımına bağlanan ve onunla birlikte çalışan ek komponentler, direksiyon cihazlarını ve iniş takımı toplama mekanizmalarını içerebilir. Komponentlerin çoğu, ağır iniş yüklerini destekleyen ve iniş takımlarının uçağın ağırlığı altında çökmesini önleyen yapısal elemanlardır. Malzemelerin, bir uçağın tam dolu yakıt yüküne sahip olduğu ve iniş sırasındaki yüksek darbe yüklerini taşıdığı durumlarda, ağır kalkış ağırlığını destekleyecek kadar güçlü olması gerekir. Bu nedenle iniş takımı malzemelerinin yüksek statik mukavemete, iyi kırılma dayanıklılığına ve yorulma mukavemetine sahip olması gerekir ve en yaygın kullanılan malzemeler yüksek mukavemetli çelik ve titanyum alaşımıdır [31].

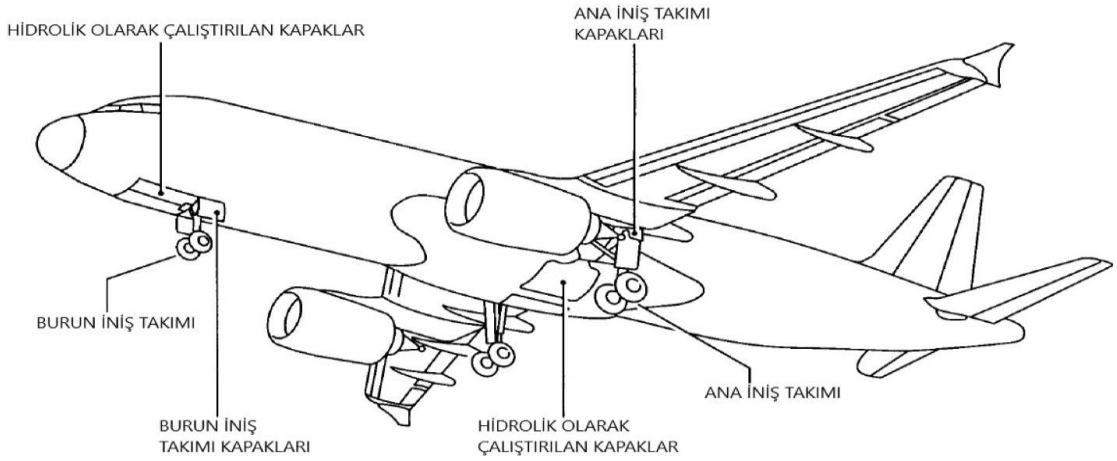
Airbus A320 uçağının iniş takımı sistemi; iki adet ana iniş takımı ve kapakları, burun iniş takımı ve kapakları, iniş takımı ve ilgili kapaklar için iki adet açılma ve toplama sistemi, iniş takımı tekerlekleri ve ilgili fren sistemleri, burun iniş takımı istikamet (direksiyon) sistemi ve iniş takımı gösterge ve uyarı sisteminden oluşur. İniş takımı, uçağı yerde destekleyen ve taksi ve iniş yüklerini sönümleyen oleo-pnömatik amortisörlerdir. Uçuş sırasında iniş takımı, uçağın gövdesinin alt kısmındaki iniş takımı yuvalarına geri çekilir. İniş takımı açıldığında veya toplandığında ilgili kapaklar uçağın aerodinamik hatlarını oluşturacak şekilde kapanır. Ana iniş takımı, uçağın alt tarafındaki bölmelere toplanır. Ana iniş takımı bölmeleri, ana iniş takımı kapaklarıyla kapatılır. Ana iniş takımı, 730 ve 740 bölgelerinde arka spar ile iniş takımı rib 5 arasındaki kanatta yer alır. Uçağı yerde destekler ve iniş, kalkış ve taksi sırasında yükleri sönümlerler. Her ana iniş takımının oleo-pnömatik amortisör içeren bir ana iniş takımı ayağı vardır. İniş takımı, ana iniş takımı yuvalarının kullanılabilir alanına çekilir. İki parçalı bir yan destek düzeneği ana iniş takımını uzatılmış konumda tutar. Kilit desteği, yan destek tertibatını kilitleme konumunda sabit tutar. Her ana iniş takımı bölmesini üç kapak kapatır. Bunlar; hidrolik olarak çalıştırılan bir ana kapak, mekanik olarak çalıştırılan menteşeli bir kapak ve ana iniş takımı ayağında bulunan bir sabit kaporta kapağıdır. Kapak açma mekanizması, ana iniş takımı bölmesine erişim için ana kapağın yerde açılmasını sağlar [37].



Şekil 3.7. Ana iniş takımı bileşenleri [37]

Burun iniş takımı frame 19 ile frame 20 arasındaki yapıya asılıdır. Burun iniş takımı ve burun iniş takımı kapaklarını içerir. Burun iniş takımı kapağı oleo-pnömatik amortisör içerir ve gövdedeki bölmeye doğru ileri yönde toplanır. Kilit desteğine sahip iki parçalı bir kuvvet çubuğu tertibatı, bacağı uzatılmış konumda kilitler. Bacakta hidrolik olarak çalıştırılan bir istikamet mekanizması bulunur. Burun iniş takımı bölmesini dört kapak ve bir kaporta kapatır. Bunlar; hidrolik olarak çalıştırılan iki ön kapak, mekanik olarak çalıştırılan iki arka kapak ve burun iniş takımı ayağında bulunan sabit bir kaportadır. Kapak açma mekanizması, burun iniş takımı bölmesine erişim için ön kapakların zeminde açılmasını sağlar. Normal açılma ve toplama sistemi, sol ve sağ ana iniş takımı ve kapaklarını ve burun iniş takımı ve kapaklarını açar veya toplar. Açılma ve toplama sistemi elektrikle kontrol edilir ve hidrolik olarak çalıştırılır. Birbirinden bağımsız olarak bağlanan iki elektrik sistemi, hidrolik bileşenlerin çalışmasını kontrol eder. Her sistemde, iniş takımı kontrolü ve arayüz ünitesi ve iniş takımı komponentlerinin konumunu göstermek için yaklaşma sensörleri bulunur. Hidrolik devrede iniş takımını açan ve toplayan, kapakları açıp kapatan aktüatörler bulunur. İniş takımı kontrolü ve arayüz ünitesi, iniş takımını açmak veya toplamak ve kapakları belirli bir sırayla hareket ettirmek için valf tertibatının seçimlerini yapar. Serbest düşme açılma sistemi, normal açılma ve toplama sisteminin mevcut olmaması durumunda ana iniş takımı ve burun iniş takımını açar. Sistem elektriki döner tip aktüatörler içerir. Aktüatörler; iniş takımını, kapak kilitlerini ve hidrolik valfleri açmak için mekanik bağlantıları çalıştırır. Bu, yerçekiminin iniş takımını uzatmasını sağlar. Tekerlekler alüminyum alaşımdandır ve iç lastiksiz radyal

veya çapraz katlı lastiğe sahiptir. Ana iniş takımı tekerlekleri, bağımsız olarak tedarik edilen iki takım pistonun çalıştırdığı çok diskli karbon frenlere sahiptir. Normal fren sistemi, uçağın yerde hareket ederken hızını azaltmak için kullanılır. Fren ve direksiyon kontrol ünitesi normal frenlemenin çalışmasını kontrol eder. Her frende hidrolik olarak çalıştırılan iki piston bulunur. Frenleme gerektiğinde, hidrolik basınç yeşil ana hidrolik sisteminden sağlanır. Sistemin manuel ve otomatik olmak üzere iki çalışma modu vardır ve her modda otomatik kayma önleyici koruma sağlar. Normal fren sistemi mevcut değilse, kontrol otomatik olarak alternatif fren sistemlerinden birine geçer. Kayma önleyici alternatif frenleme, ikincil bir elektro-hidrolik fren sistemidir. Kayma önleme sistemi, tekerlekleri kayma sınırında tuttuğundan maksimum frenleme verimliliği sağlar. Normal fren sisteminde arızaların meydana gelmesi durumunda otomatik olarak kullanılabilir. Park freni sistemi elektro-hidrolik bir sistemdir. Uçağın park halindeyken hareket etmesini engellemek için kullanılır. Diğer tüm fren sistemlerinin mevcut olmaması durumunda uçağı durdurmak için de kullanılabilir. Sistem, alternatif fren sistemindeki akümülatörlerden çalışır. Direksiyon sistemi, fren ve direksiyon kontrol ünitesi tarafından kontrol edilir. Direksiyon sistemi, yerde hareket ettiğinde uçağın yönünü değiştirir. Sistem, burun iniş takımı tekerleklerinin yönünü değiştiren bir direksiyon mekanizmasını çalıştırmak için yeşil ana hidrolik güç sistemini kullanır. Kokpitteki iki el çarkı vericisi, fren ve direksiyon kontrol ünitesine birincil direksiyon girişlerini sağlar. Rudder pedalları ve otopilot, uçuş kontrol birincil bilgisayarları aracılığıyla fren ve direksiyon kontrol ünitesine ikincil girdi sağlar. Uçağın yer hareketi sırasında burun tekerleklerinin serbestçe hareket etmesini sağlamak için sistemin çalışması iptal edilebilir [37].



Şekil 3.8. İniş takımı komponentleri [37]

3.2. Yapı Kusurları

Malzemelerin çok çeşitli ortamlarda ve durumlarda çalışması ve performans göstermesi gerekir. Güvenlik ve güvenilirlik gereklilikleri, malzeme ve bileşenlerin kendi ortamlarında ve koşullarında zamanından önce arızalanmadan iyi performans göstermesini gerektirir. Malzemelerin bozulmasına neden olabilecek çok sayıda faktör ve süreç vardır. Kritik bileşenlerin zamanından önce arızalanması; üretim kaybına ve kötü itibara neden olmanın yanı sıra birçok durumda felaketle sonuçlanabileceğinden, bu arıza nedenlerini anlamak ve kontrol etmek çok önemlidir. Teknolojideki ilerlemeler ve malzemelerin ve bunların tasarımının anlaşılması ve tahribatsız muayene yöntemleri gibi gelişmiş muayene ve test yöntemleri nedeniyle, metal kusurları her yıl üretilen milyonlarca ton metalin yalnızca son derece düşük bir yüzdesinde meydana gelir. Meydana gelen kusurlar esas olarak üç kategoriye ayrılır. Operasyonel kusurlar; aşırı yük, aşınma, korozyon ve stres-korozyon, gevrek kırılma ve metal yorgunluğundan kaynaklanabilir. İkinci kategoriye uygun olmayan tasarımdan kaynaklanan kusurlar girmektedir. Üçüncü tip kusur ise dövme, sertleştirme, temperleme ve kaynak gibi ısıl işlemlerden ve taşlama ısısından kaynaklanan yüzey çatlaklarından kaynaklanmaktadır [38].

3.2.1. Korozyon

Bazı soy metaller dışında tüm metaller olağan korozyondan kaynaklanan bozulmalara maruz kalır. Örneğin demir, doğal demir oksit durumuna geri dönme eğilimindedir. Diğer metaller sülfitlere, oksitlere veya karbonatlara dönüşür. Binalar, gemiler, makineler ve otomobillerin tümü çevrenin etkisine maruz kalır. Ortaya çıkan korozyon çoğu zaman onları işe yaramaz hale getirir ve hurdaya çıkarılmaları gerekir. Korozyon nedeniyle yılda milyarlarca dolar kayıp yaşanıyor. Korozyon ayrıca, destekleyici yapıların aşındığı köprülerde veya tanecikler arası korozyon adı verilen sinsi bir korozyonun uçağın yapısal elemanlarını zayıflatıp ani bir arızaya neden olabileceği uçaklarda olduğu gibi tehlikeli koşulların hâkim olmasına da neden olabilir [38].

Korozyon, havacılık endüstrisi için pahalı bir sorundur ve eski uçaklardaki tüm metal komponent arızalarının yaklaşık dörtte birini oluşturur. Korozyon uçaklarda birçok farklı şekilde meydana gelir. En yaygın türleri gerilme korozyonu, yorulma korozyonu, çukurcuk korozyonu ve yarık korozyonudur. Gerilme korozyonu ve korozyon yorulması,

yüksek mukavemetli alüminyum bileşenlerde en yaygın korozyon biçimleridir. Bu tür korozyonlar uçaklar için sinsi bir durumdur çünkü korozyon çatlağının görsel olarak tespit edilmesi zordur. Metalik uçak bileşenleri; özellikle alüminyum alaşımı, magnezyum alaşımı ve yüksek mukavemetli çelik kullanılarak yapıldığında, korozyonun zararlı etkilerine karşı koruma gerektirir. Dış metal yüzeyler, korozyon sıvılarına karşı direnç sağlayan sağlam, neme dayanıklı bir boya ile kaplanmalıdır. Daha fazla koruma sağlamak için metal ile boya arasına korozyon önleyici kimyasallar içeren bir astar uygulanmalıdır. Yüksek mukavemetli alüminyum bileşenler yüzey kaplamasıyla korunmalı ve/veya anotlanmalıdır. Çelik bileşenler kadmiyum, krom veya diğer metal koruyucu kaplamalarla kaplanmalıdır. Korozyon, bir elektrolit varlığında birbiriyle elektriksel temas halinde olan iki farklı malzemenin dahil olduğu elektrokimyasal bir süreçtir. Birbirine benzemeyen iki malzeme; iki metal (örneğin alüminyum ve titanyum), metal ve kompozit (örneğin alüminyum ve karbon fiber-epoksi tabaka) veya daha küçük ölçekte bir metal tanesinin sınırı ve çekirdeği olabilir. Elektrolit genellikle negatif yüklü klorür (Cl-) iyonları gibi iyon adı verilen yüklü atomları içeren su gibi aşındırıcı bir sıvıdır. Uçak korozyonuna karışan en yaygın elektrolit, klorür ve diğer negatif yüklü iyonları içeren sudur. Su; yağmurdan, nemden ve uçakta kullanılan içme suyundan gelebilir. Uçak yüzeylerinde kullanılan bazı havacılık sıvıları, temizleme solventleri ve boya sökücüler aşındırıcı iyonlar içerir ve bu nedenle aynı zamanda elektrolit görevi görür. Elektrokimyasal korozyon süreci genellikle galvanik hücre olarak tanımlanır. Hücre, iki farklı malzemenin bir elektrolitle temas ettirilmesiyle oluşturulur. Bir metal hücrenin anotunu, diğer metal ise katotunu oluşturur. Anot malzemesinde korozyon meydana gelirken katot malzemesi etkilenmeden kalır. Anot olan metal, katot malzemesine göre elektrot potansiyeli adı verilen daha yüksek bir negatif yüke sahiptir. Tablo 3.1'de uçaklarda kullanılanlar da dahil olmak üzere çeşitli metallerin standart elektrot potansiyellerinin sıralaması verilmektedir. Metaller, elektromotor kuvvet (emk) serisini oluşturmak için artan elektrot potansiyeline göre listelenir. Birbirine benzemeyen iki metal bir galvanik hücre oluşturduğunda; emf serisinde daha yüksek olan metal katot, serideki daha düşük metal ise anottur. Örneğin, alüminyum alaşımı magnezyumdan daha yüksektir (veya daha katodiktir) ve bu nedenle bu iki metal bir elektrolit varlığında temas halinde olduğunda, oluşturulan galvanik hücre magnezyumun paslanmasına neden olurken alüminyum etkilenmez. Başka bir örnek olarak, karbon fiber-epoksi kompozit, emf serisindeki daha yüksek konumu nedeniyle alüminyumun korozyona uğramasına

neden olur. Genel olarak, iki malzemenin elektrot potansiyeli arasındaki fark ne kadar büyük olursa, anodik metal o kadar hızlı paslanır [31].

Tablo 3.1. Deniz suyunda seçilen metaller ve kompozitler için standart elektrot potansiyeli sıralamaları [31].

↑	Altın
	Platin
Katodik (veya asil)	Karbon-epoksi
	Titanyum
	Paslanmaz çelik
	Nikel süperalaşım
	Saf nikel
	Bakır
	Kalay
	Çelik
	Alüminyum alaşımı
Anodik (veya aktif)	Kadmiyum
↓	Saf alüminyum
	Magnezyum ve magnezyum alaşımı

Uçaklarda meydana gelen korozyonun tek bir türü yoktur. Başlıca korozyon türleri; genel (veya tekdüze) yüzey korozyonu, galvanik (veya iki malzemeli) korozyon, çukurcuk korozyonu, yarık korozyonu, taneler arası korozyon, aşındırma korozyonu, soyulma korozyonu ve gerilme korozyonudur [31].

3.2.1.1. Genel Yüzey Korozyonu

Bu korozyon türü yaygın korozyon türüdür. Metalin açıktaki tüm yüzeyi üzerinde eşit şekilde ilerleyen bir elektrokimyasal reaksiyonu içerir. Yüzey koruma önlemleri nedeniyle uçaklar için genellikle ciddi bir korozyon sorunu olmamasına rağmen, tonaj bazında metalin en büyük tahribatından genel korozyon sorumludur. Gövdede kullanılan metallerin genel korozyonu yalnızca yüzey koruması hasar gördüğünde veya yanlış uygulandığında meydana gelir. Genel yüzey korozyonu bakım incelemesi sırasında gri veya beyaz toz halindeki birikintilerin varlığıyla tespit edilir [31].

3.2.1.2. Çukurcuk Korozyonu

En tahrip edici ve sinsi korozyon türlerinden biridir. Uygun koruma olmadan; uçaklarda kullanılan alüminyum, çelik ve magnezyum gibi metaller, küçük deliklerle sonuçlanan bölgesel çukurcuk korozyonuna karşı hassastır. Parçacık çevredeki metal matristen farklı bir elektrokimyasal potansiyele sahip olduğunda, belirli alaşımların yüzeyindeki çökeltilerde çukurlaşma başlayabilir. Korozyona karşı koruyucu tabakanın bulunmadığı yüzey bölgelerinde de çukurlaşma meydana gelebilir. Yüzey koruması kullanıldığında; yanlış uygulama veya aşınma, erozyon veya başka bir olaydan kaynaklanan kullanım sırasında hasar nedeniyle katmanda küçük boşluklar oluşabilir. Korozyon, koruyucu tabakadaki boşlukta bir delik şeklinde oluşur ve daha sonra yüzeyin altında daha geniş bir boşluğa dönüşür. Çoğu çukur, kanat üstü ve yatay stabilize yüzeyleri gibi yatay yüzeylerden aşağıya doğru büyür. Çukurların dikey yüzeylerde oluşma olasılığı daha düşüktür ve nadiren yatay yüzeylerin alt kısmından yukarıya doğru büyürler. Bu nedenle, uçak bileşenlerinin çukurcuk korozyonunun neden olduğu hasar açısından incelenmesi, üst yatay yüzeylere odaklanmalıdır. Çukurcuk korozyonunun neden olduğu problem; boşlukların, yorulma çatlaklarının büyümesi için potansiyel başlangıç noktaları olmasıdır [31].

3.2.1.3. Yarık Korozyonu

Yeterince bakımı yapılmamış birçok eski uçakta bulunan en yaygın korozyon hasarı türüdür. Korozif sıvıya maruz kalan metallerin yarıklarında ve diğer korumalı alanlarında lokal olarak meydana gelen agresif bir korozyon şeklidir. Yarık korozyonu; gevşek boya altı, tabakalara ayrılmış bir bağ hattı veya yalıtılmamış bir bağlantı yeri gibi iki yüzey arasında küçük bir hacimde durgun aşındırıcı sıvının sıkıştığı korumalı bölgelerde meydana gelir. Yarık korozyonunu ortadan kaldırmanın en etkili yolu, suyu bağlantılardan ve yüzeyler arasındaki dar alanlardan uzak tutmaktır. Yarık korozyonu; metalin ve aşındırıcı sıvının türüne bağlı olarak, bakım yapılmadığında hızla çukurcuk veya soyulma korozyonuna dönüşebilir. Bu nedenle uçak içindeki bağlantı elemanları delikleri ve bağlantıları gibi yarıkların, aşındırıcı sıvı girişini durduran dayanıklı bir koruyucu kaplama ile kapatılması gerekir. Yarık korozyonu; uçaklarda bulunan en yaygın korozyon türlerinden biridir ve genellikle bağlantı elemanları kafalarının altındaki yarıklarda, gevşek boyanın altında, katmanlara ayrılmış birleştirilmiş bağlantıların içinde veya yalıtılmamış bağlantı noktalarında meydana gelir [31].

3.2.1.4. Taneler Arası Korozyon

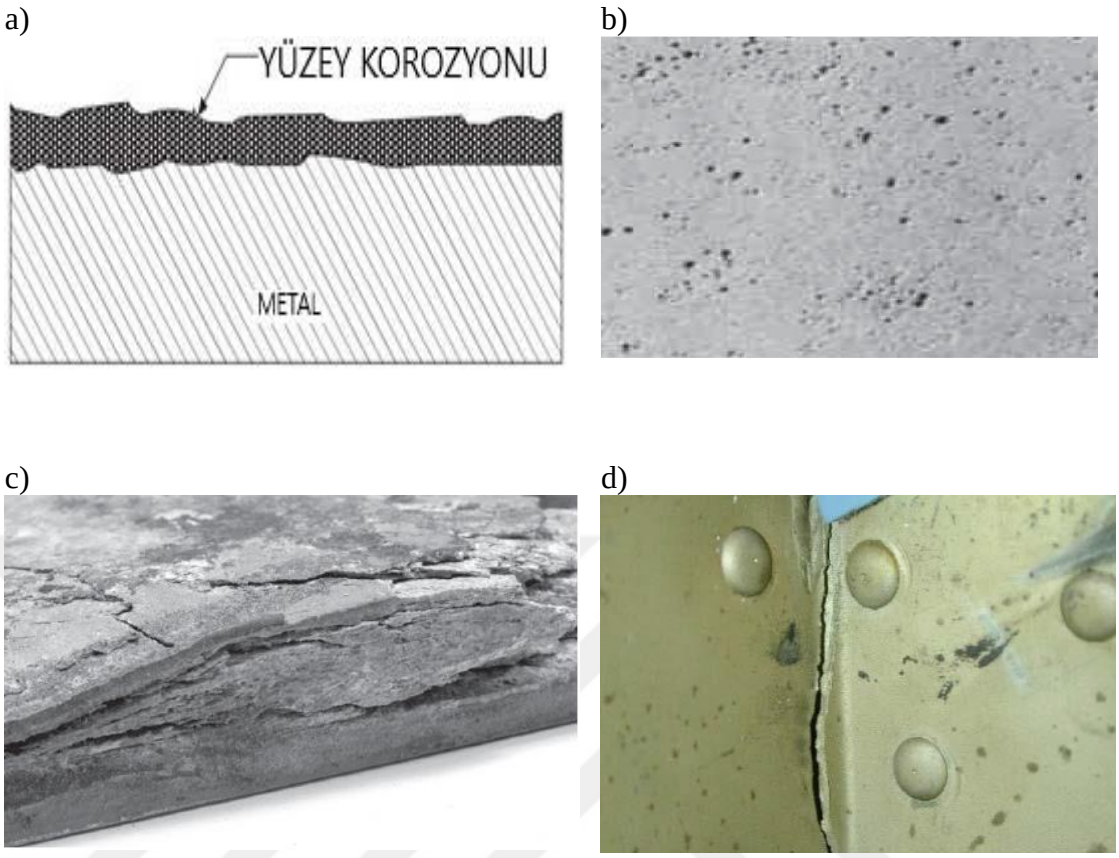
Metaldeki tane sınırlarında bölgesel olarak gözlemlenir. Tane sınırları boyunca korozyon hasarı meydana gelirken, tanelerin çekirdeği etkilenmez. Taneler arası korozyon, tane sınırının elektrokimyasal potansiyelinin tane çekirdeğinden farklı olması ve dolayısıyla tane sınırı ve tane çekirdeğinin sırasıyla küçük bir galvanik hücrenin anot ve katotunu oluşturması nedeniyle oluşur. Taneler arası korozyonun özel bir türü, tane sınırlarındaki korozyon ürünlerinin kuvvetiyle yüzey tanelerinin kaldırılmasını içeren soyulma korozyonu olarak adlandırılır. Soyulma korozyonu, korozyon ürünü katmanları arasında ince paslanmaz metal katmanlarının yapraklanmasıyla karakterize edilir. Taneler aşınma veya diğer mekanik hareketlerle yüzeyden uzaklaştırılır bu da alttaki taneciklerin yukarı kalkmasına ve soyulma işleminin devam etmesine olanak tanır. Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları soyulma korozyonuna karşı hassastır ve ısıl işlem sırasında aşırı yaşlandırma ile bu tür korozyona karşı dirençleri artırılır [31].

3.2.1.5. Aşındırma Korozyonu

Diğer birçok terimin yanı sıra sürtünme oksitlenmesi veya aşınma oksitlenmesi olarak da adlandırılan aşındırma korozyonu, titreşime veya kaymaya maruz kalan temas halindeki metallerin bozulmasını içerir. Aşındırma veya sürtünme eylemi, ince partikül parçalarının bir veya her iki malzemeden aşındırılmasıyla sonuçlanır. Bu parçalar oksitlenerek metal yüzeyi aşındıran ve tahrip eden sert, aşındırıcı parçacıklara dönüşür. Örneğin alüminyumun aşındırılması, metal yüzeyinden çok daha sert olan alüminyum oksit parçacıkları üretir. İşlemin aşındırıcı olduğu düşünülür çünkü metal parçacıklarının oksitlenmesi gerekir bu da kuru korozyonun bir biçimidir. Aşındırma korozyonu, birçok uçak kazasına katkıda bulunmasına rağmen genellikle uçaklarda yaygın bir sorun değildir. En dikkate değer durum, F-16 yakıt kontrol sistemindeki elektrik kontakları arasındaki aşındırma korozyonuydu. Kontaklar arasında meydana gelen aşınma hasarı, kontrol sisteminin ana yakıt beslemesine giden valfleri herhangi bir uyarıda bulunmaksızın otomatik olarak kapatmasına neden oldu ve bu durum, sorun tespit edilip düzeltilmeden önce en az altı F-16 kazasına neden oldu [31].

3.2.1.6. Gerilme-Korozyon Çatlakları

Rutin bakım sırasında uçak gövdelerinin muayenesinde gerilme-korozyon çatlağı belirtileri aranır. Gerilme-korozyon çatlaması; korozyonun en yaygın şekli olmasa da tüm uçak bileşeni arızalarının %5 ila 10'unu oluşturur. Çevre destekli gerilme korozyonu olarak da adlandırılan gerilme-korozyon çatlaması, gerilme ve korozyonun birleşiminden kaynaklanır. Metal üzerine etkiyen gerilim, yapısal veya aerodinamik yükler gibi uygulanan harici bir gerilimden veya metal işleme sırasında çeşitli kaynaklardan gelen bir iç gerilimden kaynaklanabilir. En yaygın olanları metal işleme (haddeleme veya bükme gibi), ısıl işlem sırasında düzensiz soğutma ve uygun gerilim giderme olmadan işlemedir. İç artık gerilimler çoğu zaman birçok metal bileşende gerilim korozyonu için itici güç sağlar. Uçak yapılarındaki bir başka potansiyel gerilme kaynağı da aşırı sıkılmış olan bağlantı elemanı kafalarıdır bu da bağlantı elemanı kafasının altındaki malzemede gerilme-korozyon çatlamasına neden olur. Metalin akma dayanımının çok altındaki gerilim seviyelerinde gerilme-korozyon çatlaması nedeniyle kusur meydana gelebilir. Gerilme-korozyon çatlaması, arıza mukavemetinde kayba neden olur ve uçaktaki bileşen arızalarının potansiyel bir nedenidir. Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları, suya ve diğer birçok aşındırıcı sıvıya maruz kaldıklarında gerilme-korozyon çatlamasına karşı hassastır. Bakır, magnezyum, çinko ve lityum gibi çözünen elementler içeren alüminyum alaşımları, gerilme-korozyon çatlamasına eğilimlidir. Bu alaşım elementleri uçak bileşenlerinde kullanılan 2000, 7000 ve 8000 alaşımlarında mevcuttur. Alüminyumun gerilme-korozyon çatlamasına duyarlılığı genellikle çözünen madde içeriğiyle birlikte artar. Isıl işleme tabi tutulabilen alüminyum alaşımlarının gerilme-korozyon çatlamasına karşı direnci, çökelme sertleşmesini desteklemek için kullanılan yaşlandırma sertleştirme işleminden de etkilenir. Alüminyumun maksimum dayanım noktasının ötesinde termal olarak yaşlandırılmasını içeren T7 ısıl işlem süreci, genellikle gerilme-korozyon çatlaklarına karşı direnci arttırmak için kullanılır. Ayrıca alüminyum yapıların, Alclad gibi korozyon koruyucu yöntemlerle gerilme korozyonuna karşı direnç gösterecek şekilde işlenmesi de önemlidir. Yüksek mukavemetli çelik bileşenler aynı zamanda gerilme-korozyon çatlamasına karşı da hassastır ve kadmiyum veya krom kaplama gibi bir yüzey kaplaması kullanılarak korunmalıdır [31].



Şekil 3.9. Korozyon türleri; (a) genel yüzey korozyonu, (b) çukurcuk korozyonu, (c) soyulma korozyonu, (d) gerilme korozyon çatlağı [31]

28 Nisan 1988'de Aloha Havayolları tarafından işletilen 19 yaşındaki bir Boeing 737 uçağı, gerilme-korozyon çatlaması sonucu üst gövdenin büyük bir parçasını kaybetti. Alüminyum üst gövdeden 4 ila 6 m'lik bir bölüm, uçak 24.000 feet yükseklikte seyrederken aniden koptu. Uçağın gövdesinin büyük bir parçası kopmadan önce uçuş ekibine herhangi bir uyarı verilmedi. Uçan enkaz nedeniyle bir uçuş görevlisi öldü ve çok sayıda yolcu yaralandı ancak pilot mucizevi bir şekilde uçağı daha fazla olay olmadan Hawaii'nin Maui adasına indirmeyi başardı. İnişten sonra uçağın incelenmesinde, gövdede çok sayıda çatlağın varlığı ortaya çıkmıştır ve bunların çoğu dış kaplama bindirme bağlantılarındaki perçin deliklerinden kaynaklanıyordu. Çatlaklara gerilme-korozyonu ve korozyon yorulması neden oldu. Kazadan önce uçak uzun yıllar Hawaii Adaları arasında uçarak işletilmişti. Adalar arasındaki uçuş sürelerinin kısa olması nedeniyle, uçak tek bir gün içinde çok sayıda kalkış ve iniş gerçekleştirdi. Kalkıştan sonra kabinde oluşan basınç ve iniş sırasında basıncın düşürülmesi, gövde kaplamasında yorulma gerilimine neden oldu. Hawaii'de faaliyet göstermek, uçağın deniz sisine ve tuzlu havaya maruz kalması anlamına geliyordu. Yorulma gerilimi ve deniz suyunun birleşimi,

gövdede hızlı bir oranda korozyon-yorulma çatlaklarının oluşmasına neden oldu. Bağlantı elemanları deliklerinde oluşan yorulma çatlakları tek bir büyük çatlak halinde birleşti ve bu da daha sonra gövdenin feci bir şekilde arızalanmasına neden oldu. Aloha olayı, gerilme-korozyon çatlağı tehlikesini çarpıcı biçimde gösteriyordur [31].



Şekil 3.10. Aloha havayolları 243 sefer sayılı uçuşunda uçak gövdesinde yaşanan korozyon yorulması sonucu oluşan hasar [31]

Ticari uçaklar, genellikle 20 yıldan fazla olan tasarım hizmet ömrünü uzatmak için yeterli korozyon korumasına sahip olacak şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Korozyon koruması ve korozyon kontrolü; uygun malzeme seçimi, suyun ve diğer nemin uçaktan uzaklaştırılması, çatlaklara ve diğer potansiyel korozyon noktalarına korozif sıvıların girişini durduracak sızdırmazlık malzemeleri, dayanıklı yüzey kaplamalarının seçilmesi, yüzey kaplamalarında korozyon önleyici bileşiklerin kullanılması ve uçağın tüm hizmet ömrü boyunca etkili korozyon kontrol programlarının kullanılmasını içerir. Havacılık metallerini korozyonun zararlı etkilerinden korumak için çeşitli yöntemler mevcuttur. Yöntemlerin çoğu; aşındırıcı sıvılara dirençli, dayanıklı, geçirimsiz bir kaplamanın uygulanmasını içerir. Yaygın kaplama yöntemleri boyama, kaplama ve anotlamadır ve genellikle yeterli korozyon koruması sağlamak için birkaç yöntem birlikte kullanılır. Ayrıca korozyon direncini sağlamak için metal bileşenlerin dikkatli tasarımı çok önemlidir [31].

3.2.2. Yorulma

Metal parçalar uzun süreler boyunca tekrarlı yüklere maruz kaldıklarında, hiçbir plastik deformasyon belirtisi olmadan akma dayanımlarının çok altındaki gerilimlerde kopabilirler. Buna yorulma hasarı denir. Titreşime veya döngüsel yüklere maruz kalan makine parçaları tasarlanırken yorulma mukavemeti, nihai çekme veya akma mukavemetinden daha önemli olabilir. Yorulma çoğu katıda gözlemlenen evrensel bir olgudur. Döngüsel yükleme, statik kırılma durumunda olduğu gibi, kopma ile sonuçlanan sürekli bir hasar birikimine yol açar. Yorulma sınırı veya dayanıklılık sınırı, arızaya neden olmadan sonsuz sayıda uygulanabilen maksimum yüktür. Belirli bir streste kırılmaya yol açan döngü sayısına genellikle yorulma mukavemeti veya dayanıklılık denir. Bir malzemenin bir dizi değişken gerilim döngüsüne maruz kaldığında kırılması olgusu yorulma olarak bilinir. Yorulmadan kaynaklanan arızalar endüstri malzemelerinin çoğunda bulunmaktadır. Bazı plastikler ve çoğu metal, dinamik olarak yüklenen yapılarda ve makinelerde yaygın olarak kullanıldığından değişen derecelerde yorulmaya maruz kalır. Yorulma hasarı, parçadaki gerilimin tersine çevrilmesinin bir sonucu olarak kademeli olarak büyümeye devam eden çentik, bükülme veya çizik tarafından başlatılan bir çatlaktan kaynaklanır.

Yorulma, uçak yapılarında ve motor bileşenlerinde görülen hasarın en yaygın nedenidir. Yorulmanın tüm metal bileşen arızalarının yarısından fazlasına neden olduğu ve korozyon, sürünme, aşınma, aşırı yükleme ve uçaktaki diğer tüm arıza kaynaklarının birleşik etkilerinden daha fazla hasardan sorumlu olduğu tahmin edilmektedir. Örneğin ortalama ömrü yaklaşık 30.000 uçuş saati olan 71 adet Boeing 747 uçağının alüminyum gövdesine yapılan onarımlar üzerinde yapılan bir araştırma, en yaygın hasar türünün yorulma çatlaması (tüm onarımların %58'i) olduğunu ve bunu korozyonun (%29) takip ettiğini ve ardından kuş çarpmasından kaynaklanan hasarın (%13) olduğunu ortaya koydu. Yorulma arızalarının görülme sıklığı metallere göre daha az olmasına rağmen, yorulma kompozit yapılara da zarar vermektedir. Yorulmanın zarar verici etkisi uçağın yaşı arttıkça artar. Eski uçaklarda yorulmadan kaynaklanan çok sayıda küçük çatlak bulunur ve bu uçakların yorulma sorunlarını düzeltmek için muayenesi ve onarımı büyük bir bakım maliyetidir. Uçak yaşlandıkça yorulma sorunu güvenlik ve yapısal güvenilirlik açısından ön plana çıkar. Yorulma, döngüsel veya değişken gerilmelerin neden olduğu hasar nedeniyle bir malzemenin yapısal özelliklerinin bozulması olarak tanımlanır.

Yorulmanın bir özelliği, malzemenin akma dayanımının altında olan döngüsel gerilimlerin neden olduğu hasar ve dayanım kaybıdır. Başka bir deyişle, elastik gerilimlerin tekrar tekrar uygulanması malzemeye zarar verebilir ve onu zayıflatabilir. Yorulmanın bir başka özelliği de malzemenin arızalanmadan önce genellikle görünür bir hasar belirtisi göstermemesidir. Yorulmanın neden olduğu hasar genellikle metal bir bileşendeki tek bir çatlak ve kompozit yapıdaki çok ince çatlaklardır ve bunlar uçağın görsel muayenesi sırasında kolayca görülmez. Yorulma hasarı, malzeme aniden ve uyarı vermeden bozuluncaya kadar fark edilmeden büyüyebilir. Havacılık malzemeleri çeşitli türde yorulmalara maruz kalabilir.

Döngüsel gerilme yorulması, yorulmanın en yaygın şeklidir ve malzemeye tekrar tekrar yük uygulanmasıyla oluşur. Yorulmanın meydana gelebileceği birçok yol arasında olan döngüsel gerilme yorulması; uçak komponentlerinin daha fazla arızalanmasına, daha fazla uçak kazasına neden olur ve yaşlanan uçakların en yüksek bakım denetimini gerektirir. Korozyon yorulması, uçaklarda kullanılan metalik malzemelerin (özellikle yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının) neden olduğu yorulma deneyiminin bir başka yaygın şeklidir ve korozyon ile döngüsel gerilme yüklemesinin birleşik etkileriyle ortaya çıkar. Aşındırma yorulması, temas eden komponentlerin aşınmasına neden olan küçük ölçekli sürtünme hareketleri nedeniyle malzemelerin giderek bozulmasıdır. Bu tür yorulma çoğunlukla; gevşemiş cıvata, perçin veya vida içeren ve böylece parçalar arasında harekete izin veren bağlantılarda meydana gelir. Akustik yorulma, gürültünün neden olduğu gerilmedeki yüksek frekanslı dalgalanmalardan kaynaklanır. Gürültünün basınç dalgaları malzemeye çarparak yorulma etkilerine neden olur. Akustik yorulmanın yaygın kaynakları jet veya pervane gürültüsüdür. Termal yorulma, termal döngü (yani tekrarlanan ısıtma ve soğutma) nedeniyle malzemelerin termal genleşmesi ve büzülmesinin neden olduğu değişken gerilmelerden kaynaklanır. Termal yorulma genellikle jet motoru bileşenleri, ısı kalkanları ve roket motoru nozulları gibi geniş bir sıcaklık aralığında çalışması gereken malzemelerde meydana gelir. Yorulma çatlakları genellikle metallerde; yüzeydeki çentikler, korozyon çukurları, boşluklar veya malzeme içindeki büyük metaller arası parçacıklar gibi gerilme yükseltici durumlarda başlar. Bu nedenle metallerin yorulma performansı; dikkatli tasarım, imalat ve bakım yoluyla gerilme arttırıcı unsurların ortadan kaldırılmasıyla artırılır. Metallerin yorulma direncini arttırmanın diğer yolları arasında, yüzey sıkıştırma gerilimlerini sağlamak için ısıl işlem

yer alır. Kompozitlerin yorulma performansı genellikle yük taşıyan liflerin elastik modülü, mukavemeti ve hacim içeriği ile artar. Karbon fiberlerin sertliği cam fiberlere göre daha yüksek olduğundan karbon fiber kompozitler üstün yorulma özelliklerine sahiptir. Karbon fiber kompozitlerin yüksek yorulma direnci, bunların birincil uçak yapılarında kullanılmasının temel nedenidir. Havacılık ve uzay mühendislerinin malzemelerin yorulma direncini anlamaları önemlidir. Yorulma direnci, yapısal malzemelerin değişken gerilme koşulları altında kabul edilebilir bir mukavemet seviyesini koruyabilme yeteneğidir. Yorulma, uçak yapılarının tasarımını etkileyen önemli bir faktördür. Havacılık ve uzay mühendisleri, uçağın ömrü boyunca yorulma hasarı toleransı (yani arızaya karşı direnç) yüksek olan komponentleri tasarlama ve malzemeleri seçme bilgisine sahip olmalıdır [31].

Japon Havayolları'nın 123 sefer sayılı uçuşu, 12 Ağustos 1985'te Tokyo Uluslararası Havaalanı'ndan Osaka Uluslararası Havaalanı'na bir Boeing 747'nin iç hat uçuşuydu. Uçak Osaka'ya doğru seyrederken aniden yüksek mukavemetli alüminyumdan yapılmış arka basınç bölmesi arızalandı. Bunun sonucunda ana kabinin basınçsız hale gelmesi, dikey stabilizeyi ve diğer bölümleri kuyruktan kopardı. Dört hidrolik sistemin tamamının de arızalanması uçuş kontrolünün tamamen kaybolmasına neden oldu. Pilotlar, motor gücünü ayarlayarak uçağı kontrol etmekte zorlandılar ancak stabilize ve kontrol sistemlerinin kaybı, uçağın phugoid döngüsü olarak bilinen vahşi salınımlar halinde kontrolsüz bir şekilde dalmasına ve yükselmesine neden oldu. Uçak 630 km/saat hızla bir dağa çarpmasıyla 15 mürettebatın tamamı ve 509 yolcunun 505'ini öldü. Bu, havacılık tarihindeki en ölümcül tek uçak kazasıdır ve 583 kişinin öldüğü Tenerife'deki ikiz uçak felaketinden sonra en fazla ölüm vakasında ikinci sırada yer almaktadır. Karmaşık bir dizi olay, 123 sefer sayılı uçağın düşmesine yol açtı ancak bunun arka basınç bölmesindeki yorulma hasarına kadar izi sürülebilir. Yedi yıl önce uçak; arka basınç bölmesine, arka gövde framelerine ve kaplamaya zarar veren bir kuyruk vuruşu olayına karışmıştı. Uçak bakım mühendisleri, hasarlı bölmeyi Boeing onaylı onarım yöntemine göre onaramadı. Kaza müfettişleri tarafından yapılan testler, uçakta yapılan yanlış onarımın yorulma ömrünü yaklaşık %70 oranında azalttığını gösterdi. Uçak, onarım ile son kaza arasındaki yedi yıllık dönemde 12.000'den fazla uçuş gerçekleştirdi. Bu süre zarfında, her kalkış ve inişte kabinin basınçlandırılması/basıncının düşürülmesi nedeniyle arka bölmeye uygulanan döngüsel gerilme yükleri altında onarım sırasında yorulma çatlakları başladı

ve yayıldı. Çatlaklar fark edilmeden kaldı ve bölmenin yıkıcı bir şekilde bozulmasına neden olacak kritik uzunluğa ulaştı. Kaza, malzemenin kendisinden ziyade yanlış onarımdan kaynaklanmış olsa da uçağın yapısal güvenilirliği ve emniyetinde yorulmanın önemini trajik bir şekilde ortaya koymuştur [31].

Metal yorulmasından kaynaklanan çok sayıda uçak kazası yaşandı ancak Comet uçak kazaları, yorulmayı havacılık güvenliğinde ön plana çıkardı. Comet uçağı, İngiliz De Havilland şirketi tarafından tasarlandı ve ilk olarak 1952 yılında İngiliz Havayolları tarafından hizmete sunuldu. Comet, havacılık ve uzay teknolojisinde büyük ilerlemelerin olduğu bir çağda devrim niteliğinde bir uçaktı. Comet'in, 35.000 feette seyredebilmesini sağlayan, alüminyum alaşımından yapılmış basınçlı bir kabini vardı. Eski tarz uçaklarla karşılaştırıldığında kabinde, yolcuların daha geniş bir görüş açısına olanak tanıyan ekstra geniş pencereleri vardı. Havacılık ve uzay endüstrisinin sektörleri, yaşanacak olan iki kaza güvenlik konusunda ciddi endişeler yaratana kadar Comet'i geleceğin uçağı olarak övüyordu. İlk Comet kazası 1954'ün başlarında, ilk uçuştan iki yıldan az bir süre sonra meydana geldi ve 29 yolcu ve 6 mürettebat öldü. Bu kazanın nedeni, uçağın uçuş sırasında parçalanıp denize düşmesi nedeniyle hemen anlaşılamadı. Sadece dört ay sonra başka bir Comet uçuş sırasında parçalandı ve bu sefer 14 yolcu ve 7 mürettebat öldü. Kaza müfettişleri tarafından ikinci uçağın enkazı çıkarıldı ve hasarlı gövde yeniden inşa edildi. Gövdedeki arızanın, tasarımı nedeniyle gerilim artırıcı olan anten açıklığından başlayan bir çatlağa dayandığı anlaşıldı. Daha yakından incelendiğinde, gövde malzemesinin kırılma yüzeyinde dalgalanmalar ortaya çıktı bu da sorunun yorulma olduğunu gösteriyordu. Anten açıklığında bir bağlantı elemanı deliğindeki gerilim konsantrasyonunun bir yorulma çatlağının oluşmasına neden olduğu sonucuna varılmıştır. Çatlak, kalkıştaki basınç ve inişteki basıncın azalması nedeniyle gövdenin döngüsel gerilimi altında büyüdü. Çatlak, uçuş sırasında dış kaplamanın büyük bir kısmı aniden gövdeden kopana kadar fark edilmeden büyüdü. Comet kazaları, dikkatli tasarımın ve yorulmaya dayanıklı yapısal malzemelerin yorulma arızasını önlemek için kritik öneme sahip olduğunu en trajik şekilde vurguladı [31].

4. BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

4.1. Literatür Taraması

Gao ve diğ. [1] çalışmasında, geleneksel TOFD algılama yönteminin - kırınım sinyalinin küçük genliği ve düşük sinyal gürültü oranı gibi dezavantajları göz önüne alındığında, sonlu eleman yöntemi hesaplaması ve deneysel doğrulama için geleneksel dönüştürücü yönteminin yerine bir faz dizi lazer kaynağı kullanılmıştır. Sonuçlar; tek lazer kaynağı ile karşılaştırıldığında faz dizi lazer kaynağının, kırınım sinyalinin genliğini ve sinyal gürültü oranını önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir.

Caminero ve diğ. [3] bu çalışmada, faz dizi ultrasonik tekniğin kompozit yapılardaki iç hasarı belirleme ve değerlendirme yeteneğini değerlendirmiştir. Bu amaçla, farklı derinliklerde karbon fiber takviyeli epoksi tabakalara çeşitli boyut ve şekillerde çeşitli yapay yabancı maddeler hassas bir şekilde gömülmüştür. Kompozit tabakalara darbe hasarı oluşturmak için ağırlık düşürme darbe testleri yapılmıştır. Zar zor görünen darbe hasarına neden olan farklı darbe enerji seviyeleri seçilmiştir. Etkilenen CFRP ve 3D baskılı sürekli takviyeli kompozit tabakalar, faz dizi ultrasonik C-tarama tekniği kullanılarak değerlendirilmiştir. Faz dizi ultrasonik teknik, 3D baskılı kompozit tabakalarda dahili hasarı tespit etme yeteneğini göstermiştir. Dahili hasarı değerlendirmek için faz dizi ultrasonik tekniğin kullanılmasının, kompozitlerde darbe (çarpma) olaylarının karmaşıklığının daha iyi anlaşılmasını sağlayabilecek uygun ve avantajlı bir teknik olduğu sonucuna varılmıştır.

Jung ve diğ. [5] bu çalışmada, NDT yöntemlerinin dezavantajlarının analizinin ardından dezavantajlarına ek olarak faz dizi ultrasonik test uygulamıştır. Kusur tespitinin kesinliğini ve kusur boyutunun hesaplanmasını geliştirmek için bir prob tasarımı önermişlerdir. Mevcut UT, personelin becerisine göre karışık kusurlarda veya düşük yükseklikte kusurlarda sapmalar göstermiştir. Öte yandan PAUT, personelin becerisine daha az bağlıdır. Ayrıca UT, kusurları tespit etmek için satır satır tarama yöntemini

uygularken, inceleme için 3,5 saatten fazla süre kullandı, PAUT ise yarım saatten az süren doğrusal tarama uyguladı. Bu nedenle PAUT, algılama hızını UT'ye göre yedi kattan fazla artırdı. Algılama hızındaki gelişme böylece doğrulandı. PAUT, radyasyona maruz kalma konusunda herhangi bir sorunla karşılaşmadı ve bu sayede güvenlik açısından ileri teknoloji olduğunu kanıtladı.

Humeida ve diğ. [9] bu çalışmada, NDE'de ultrasonik dizi inceleme tekniklerinin optimizasyonu için genel bir çerçeve sunmaktadırlar. Ultrasonik diziler mühendislik yapılarının bütünlüğünü korumak ve performanslarını değerlendirmek için rutin olarak kullanılmaktadır. Bu tür incelemeler genellikle, zahmetli, zaman alan ve optimal bir yaklaşımla sonuçlanamayabilen deneysel ölçümler ve parametrik çalışmalar kullanılarak manuel olarak optimize edilir. Kusur tespit oranı, ana inceleme hedefi olarak belirlenmiş ve optimizasyon çerçevesinin performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Muayenenin istatistiksel modellemesi, optimizasyon problemini oluşturmak ve çatlak türü ve konumu, malzeme özellikleri ve geometrisi vb. gibi muayene belirsizliğini dahil etmek için kullanılmıştır. Global optimizasyon problemini çözmek için bir genetik algoritma kullanılmıştır. Düzlem B-tarama ve toplam odaklama yöntemi görüntüleme algoritmalarının optimal kullanımı da araştırılmıştır. Optimizasyon şemasının performansı simülasyonda araştırılıp daha sonra deneysel olarak doğrulanmıştır. Dizinin boyutu, dizi açıklığının boyutu, frekans ve eleman boyutları gibi birçok tasarım parametresi araştırılmıştır. Ele alınan denetim senaryoları için; toplam odaklama yönteminin, incelemede belirsizliğin beklendiği senaryolarda düzlem B-tarama görüntülemeye göre istatistiksel anlamda daha iyi saptanabilirlik sağladığı görülmüştür.

Bossi ve diğ. çalışmasında [21] polimer kompozitlerde meydana gelebilecek hasar türlerinden bahsetmişlerdir. Gerilim, sıkıştırma veya kesme altında hasar giderek meydana gelir ve polimer kompozitler, çıplak gözle görülemeyecek hasarlarla sonuçlanabilecek düşük hızlı darbelere özellikle eğilimlidir. Bu, polimer kompozit uçak yapılarının hem üretim sırasında hem de bakım sırasında test edilmesi ihtiyacını vurgulamaktadır. Çalışmada uçak yapılarının tahribatsız muayenesi için halihazırda kullanılan metodolojileri ayrıntılı olarak anlatılmış ve örneklerle desteklenmiştir. Belirli bir uygulama için kullanılan kesin yöntem, herhangi bir hasarın tespit edilmesinin yeterli olasılığına bağlı olarak ekonomik maliyete bağlı olacağı sonucuna varılmıştır.

Meola ve diğ. [26] kızılötesi termografi ve ultrasonik tarama ile karbon fiber takviyeli kompozitlerin tahribatsız değerlendirmesi üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında faz dizi ultrasonik tekniği kullanmanın avantajlarını incelediler ve c-tarama, s-tarama ve faz görüntülerinin entegre bir analizinin, malzemenin ve kalınlık boyunca hasarın yerinin daha iyi değerlendirilmesine olanak tanıdığını belirlemişlerdir.

Zhou ve diğ. [39] bu çalışmada, ilk kez ultrasonik tarama verileri üzerinde iletilebilirlik analizi uygulayarak, çelik boruların çevre kaynaklarına yakın çevresel yüzey çatlaklarını tespit etme ve boyutlandırmada ultrasonik faz dizi testinin hassasiyetini artırmayı amaçlamışlardır. İletilebilirliğe dayalı yaklaşım, bozulmamış malzemelerde ve çatlağı olan malzemelerde yalnızca A-tarama verilerinin göreli büyüklüğünden çatlakların veya çatlak benzeri kusurların varlığını saptar ve dolayısıyla bir referans bloğu gereksinimini ortadan kaldırır ancak malzeme özelliklerini korur. A-tarama verilerinin iletilebilirliği, bir konumdaki A-tarama tepe genliğinin diğerininkine oranını ifade eder. Bu çalışma, önerilen iletilebilirliğe dayalı yaklaşımı doğrulamak için deneysel bir çalışma rapor etmektedir. Bu çalışma ayrıca, farklı konumlarda ölçülen ultrasonik A-tarama verileri arasındaki iletilebilirlik yoluyla çatlakları tespit etmek için yeni bir yaklaşım önermektedir. Deneysel çalışma ayrıca, içinde makul bir doğru çatlak boyutunun takip edilebilir olduğu çatlak konumundan olan mesafe eşiğini de inceler. Ultrasonik faz dizi sensörünün göreli hareketi sayesinde, çatlak derinlikleri dalga yayılım teorisinden elde edilir. Yorulma ve kırılma testleri tarafından üretilen yüzey çatlaklarına sahip çevresel kaynaklı yedi çelik borudaki geleneksel ultrasonik faz dizi testleriyle ve yinelenen kırılma yüzeylerinden yapılan ölçümle yapılan karşılaştırma, önerilen çatlak boyutlandırma yaklaşımının uygulanabilirliğini doğrulamaktadır.

Katunin ve diğ. [40] uçak yapılarında hasar tanımlaması üzerinde çalışmıştır. Mevcut çalışma, uçak kompozit yapılarının incelenmesi sırasında çeşitli NDT tekniklerinin performansını araştırmak için yapılmıştır. Bu makalede yazarlar, uçak operasyonu sırasında meydana gelen tipik hasar ile çeşitli kompozitlerden yapılmış uçak yapılarına uygulanan birkaç seçilmiş NDT yönteminin etkinliğini analiz etmişlerdir. Üç tür yapı düşünülmüştür; cam elyafı ile güçlendirilmiş plastik (GFRP) levha, bir GFRP çekirdeğinden ve üstte ve altta iki kat alüminyum alaşımından oluşan çok katmanlı bir Al-GFRP-Al levhası ve bir uçağın hasarlı dikey staibilizesinden çıkarılan bir CFRP yapısı. Çeşitli NDT tekniklerinin etkinlik analizini gerçekleştirmek için ultrasonik

tarama, termografik inceleme, PZT tabanlı inceleme ve test edilmiş bir yapının mod titreşim şekillerinin temassız olarak edinilmesine dayalı titreşim tabanlı hasar tanımlama tekniği seçilmiştir. Test edilen yapılar, uçak kompozit yapıları için tipik olan ve operasyon sırasında meydana gelen zar zor görünen darbe hasarı ve delaminasyonları içerir. Bu hasarların tespiti ve yerini belirlemek ile seçilen yöntemlerin performansının analizi sunulan çalışmanın ana amacıdır. Katunin ve arkadaşları hem termografinin hem de ultrasoniğin, tesir edilen darbe hasarının tespiti ve yerini belirlemede büyük etkinlik gösterdiği ve termografinin daha hızlı olmasına rağmen ultrasonik tekniğin daha ayrıntılı hasar değerlendirmesi ve daha fazla sayıda delaminasyon sağladığı sonucuna varmıştır.

Zhang ve diğ. [41] kalın kompozitlerde ultrasonik kusur karakterizasyonunu hem deney hem de simülasyon yoluyla incelemiştir. Kompozit mikro yapısı, B-tarama görüntüleri ile karşılaştırma için kullanılan X-ray CT kullanılarak incelenmiştir. X-ray CT ve UT hem yüzey hem de yüzey altı kusurlarını inceleme potansiyeline sahiptir. Sınırlı erişime sahip büyük havacılık kompozit yapılarının yerinde denetimini gerçekleştirmek için pratik endüstriyel uygulamalarda UT tercih edilir. Bu araştırma, farklı frekanslar altında B-tarama görüntülerinde kusur varlığının anlaşılmasını kolaylaştırarak havacılık kompozitlerinin ultrasonik testini iyileştirme yönünü göstermiştir.

Tabatabaeipour ve diğ. [42] kök kusur tespiti için modifiye edilmiş bir ultrasonik muayene yönteminin faydasını değerlendirmek için yürütülen bir araştırma yapmışlardır. Kök kusurları, sürtünme karıştırma kaynaklı bileşenlerdeki yaygın kusurlardan biridir. Sürtünme karıştırma kaynaklı yapıların muayenesi için ultrasonik faz dizi ve girdap akımı yöntemleri dahil olmak üzere çeşitli tahribatsız muayene teknikleri bildirilmiştir. Bu çalışmaların sonuçları, sürtünme karıştırma kaynaklı bileşenlerin kök kusurlarının muayenesi ve yorumlanması için C-tarama ölçümlerinin güvenilir bir teknik olabileceğini göstermektedir.

Dwivedi ve diğ. [43] mühendislik malzemeleri ve kompozitte kusur tanımlama ve karakterizasyonu için çeşitli NDT yöntemlerini gözden geçiren ve en etkili yöntemi bulmayı amaçlayan bir çalışma yapmışlardır. Tahribatsız muayene yöntemleri hakkındaki son gelişmeleri ve araştırmaları incelemişlerdir. Bu makalede, görsel test, ultrasonik test (UT), termografi, radyografik test, elektromanyetik test, akustik emisyon (AE) ve kesme incelemesi gibi NDT uygulamalarının yeteneklerine ve bu yöntemlerin avantajları ve

dezavantajlarına ilişkin bir inceleme yapılmıştır. Literatür araştırması ve incelemelere dayanarak, çeşitli tahribatsız tekniklerinin kompozit, malzeme ve inşaat malzemesinde (beton) kusur araştırması için mevcut olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca literatür araştırmasından, bu kompozit aletlerin çoğunlukla kritik güvenlik uygulamalarında kullanıldığı örneğin uçak birincil yapılarında kullanıldığı sonucuna varmışlardır. Bundan dolayı kompozit malzemelerin tahribatsız muayenesi daha önemli ve talepkar hale gelmiştir. Yakın geçmişte yapılan araştırmaları incelendiklerinde ise hiçbir tahribatsız muayene yönteminin, kendi sınırlamaları olduğu için kompozit malzemede kusur karakterizasyonu konusunda yeterli sonuç vermediğini görmüşlerdir. Bu nedenle, daha iyi sonuç almak ve araştırmanın etkinliğini artırmak için iki veya daha fazla tekniğin kombinasyonu kullanılmasının gerektiğini belirtmişlerdir. Tahribatsız testin güvenilirliği ve güven seviyesi, genellikle çoklu test yöntemleri kullanılarak artırılır. Karmaşık parça muayenesi için ultrasonik tekniğin yaygın olarak kullanılması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır.

Yang ve diğ. [44] ortotropik köprü tabliyelerindeki tek ve çift taraflı kaynaklı bağlantıların yorulma hasar modu, çekme yapısal gerilme yöntemi kullanılarak tanımlanan yorulma hasar yolunu doğrulamak için faz dizi görüntüleme tekniği ile yenilikçi bir şekilde araştırma yapmışlardır. PAUT teknolojisi uygulanmakta ve yorulma çatlaklarının başlama yerini, derinliğini ve uzunluğunu daha iyi doğrulukla belirlemek için ilk olarak kırılma alanında hesaplama analizi yöntemi önerilmiştir. PAUT teknolojisi kullanılarak ortotropik çelik köprü tabliyelerindeki tek ve çift taraflı kaynaklı bağlantıların yorulma hasar modunun deneysel araştırması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, yorulma testi sonuçlarına göre yorulma çatlaklarının başlama yeri, derinliği ve uzunluğu belirlenmiştir. Tek ve çift taraflı kaynaklı birleştirmeler arasındaki yorulma performansının karşılaştırılması yapılmıştır. Tek ve çift taraflı kaynaklı tabliye U-nervürleri bağlantılarının yorulma hasar modları, kalınlık modu olarak özetlenir ve yorulma çatlağı, tabliye kalınlık yönü ile birlikte yayıldığı sonucuna varılmıştır. Yorulma çatlak uzunluğunu ve derinliğini hesaplamak için kullanılan analiz yönteminin etkili ve doğru olduğu kanıtlanmıştır.

Reiner ve diğ. [45] çalışmasında, çekme ve sıkıştırmada ilerleyici kırılma testlerine tabi tutulan yarı-izotropik T800SC/3900-2B CFRP tabakalardaki translaminer kırılma özelliklerini ölçmek için dijital görüntü korelasyonunu faz dizi ultrasoniklerle birleştiren

bir yöntem kullanmışlardır. Dijital görüntü korelasyonu ile faz dizi ultrasonik kombinasyonu, fiber baskın translaminer çatlak uzunluğunun, hasar yüksekliğinin ve dolayısıyla hasar direnci eğrilerinin tutarlı bir şekilde ölçülmesinin yanı sıra kırılma işlem bölgesinin sürekli izlenmesini sağlar. Bu çalışmada bir ara katman sertleştirilmiş prepreg kompozit, Toray T800SC/3900-2B tek yönlü prepreg bant kullanılmıştır. Orta katsayılı ve yüksek çekme değerine sahip bir karbon fiber olan T800SC, yüksek toklukta 3900-2B epoksi reçine ile önceden emprenye edilmiştir. Amorf poliamidin ince termoplastik parçacıkları prepregin yüzeyinde biriktirilir ve laminasyon ve kalıplamadan sonra delaminasyon ve darbe hasarı direncini iyileştirmek için ara katmanda lokalize edilmiştir. Bu oldukça sertleştirilmiş prepreg sistemi, Boeing şirketinin ticari uçaklarının birincil yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yarı izotropik T800SC/3900-2B tabakalarlar üzerinde aşırı yükseklik kompakt germe ve kompakt sıkıştırma testleri yapılmıştır. Her iki kırılma testinde, 89 kN (20.000 lb) MTS yük hücresi ile vidalı bir Instron tek eksenli test makinesi kullanılmıştır. Tüm numuneler, yer değiştirme kontrollü koşullar altında 0,25 mm/dk yükleme hızıyla yüklenmiştir. Monoton yüklemelere ek olarak, çoklu yükleme-boşaltma döngüleri ve ardından her yük döngüsünden sonra faz dizi ultrasonik testler gerçekleştirilmiştir. Kompakt sıkıştırma testlerinde 0,27 kN standart sapma ile 8,2 kN tutarlı maksimum kuvvetler verdiği görülmüştür. Kompakt sıkıştırma testlerinden elde edilen bulgulara benzer şekilde, aşırı yükseklik kompakt germe testlerinde maksimum kuvvet için 0,25 kN'lik düşük bir standart sapma ile sonuçlanan tutarlı kuvvet ölçümleri gözlemlenmiştir. Dijital görüntü korelasyonunun, hasar yükleme yönüne normal olan dar bir bantla sınırlandığında; fiber baskın translaminar çatlak uzunluğunun, hasar yüksekliğinin ve dolayısıyla hasar direnç eğrisinin tutarlı bir şekilde ölçülmesini sağladığı gösterilmiştir. Dijital görüntü korelasyonu gerinim alanlarını ultrasonik c-taramalarla kaplayarak, delaminasyon ve matris çatlaması gibi kısmi translaminar hasara karşılık gelen dijital görüntü korelasyonunu gerinim değerlerini kalibre etmek için mümkün olduğu sonucuna varmışlardır.

Filho ve diğ. [46] bu çalışmada, %9 nikel çelik ark kaynaklı bağlantılarda süreksizlik algılama güvenilirliğini değerlendirmek için bir tespit olasılığı yürütmeyi amaçlamaktadır. Belirli bir tahribatsız muayenenin süreksizlik tespitinin güvenilirliğini değerlendirme yaklaşımlarından biri, tespit olasılığı gibi mevcut deneysel verilerin istatistiksel analizidir. Tespit olasılığı, 1960'ların sonunda geliştirildi ve üretim

sürecinden kaynaklanan ve operasyon sırasında oluşan süreksizliklerin tespit edilebilirliğini değerlendirmek için optimize edilmiş bir yaklaşım sunuyor. Bu uygulamada, %9 nikel çelik boru ek yerleri, anizotropik ve kaba taneli kaynak metalinin teşvik ettiği ses zayıflaması ve sapma nedeniyle ultrasonik muayenede zorluklar sergileyen dolgu metali olan nikel bazlı süper alaşım 625 ile kaynaklanmıştır. Ultrasonik test, sistem konfigürasyonuna bağlı olarak, süreksizlik yüksekliğini belirleyebilen ve elde edilen sinyalin genliği ile ilişkilendirebilen tek geleneksel hacimsel tahribatsız muayene yöntemi olduğundan dolayı bu çalışmada kullanılmıştır. Ultrasonik faz dizi testi, bir Olympus Omniscan MX2 32-128 ekipmanı, 2,25 MHz frekanslı bir Olympus 2.25L32-A32 faz dizi dönüştürücü, bir Olympus ENC 1-2.5-DE kodlayıcı (mm başına 12 adım) ve bir Olympus TomoView 2.10 R5 veri analizörü ile gerçekleştirilmiştir. İncelemeler, daldırma muayanesini simüle etmek için hem Rexolite®'den oluşan geleneksel bir takoz hem de suyla doldurma ile oluşturulmuş bir takoz kullanılarak enine ve boyuna dalgalara sahip ultrasonik faz dizi dönüştürücüler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Muayene raporları, her bir ultrasonik teknik tarafından tespit edilen süreksizliklerin konumlarını ve A-tarama, S-tarama ve B-tarama görüntülerinden elde edilen süreksizlik boyutunu içerir. Enine dalgalarla yapılan inceleme, boyuna dalgalarla yapılandan çok daha az süreksizlik tespit etmiştir. Ayrıca, kaynak metali kapak geçişi kaldırıldıktan sonra boyuna dalgalarla yapılan inceleme, %9 nikel çelik kaynaklı birleştirmelerde çok daha fazla güvenilirlik sergilemiştir. Elde edilen tespit olasılığı eğrilerinin, en iyi muayene prosedürünün üç farklı faz dizi ultrasonik test konfigürasyonunun bir kombinasyonunu içerdiğini doğruladıkları için, %9 nikel çelik kaynaklı bağlantıların muayenesini değerlendirmek için uygun bir araç olduğu gösterilmiştir.

Allam ve diğ. [47] yaptıkları çalışmada, lazer toz yatak füzyon birleştirme kullanılarak üretilen eklemeli imalat parçaları için bir kalite güvence aracı olarak ultrasonik test araştırılmasını yapmışlardır. Eklemeli imalat (AM), karmaşık geometriye sahip parçaların maliyet ve enerji açısından verimli bir şekilde üretilmesini sağlar. Eklemeli imalat parçalarını incelemek için görsel test, radyografik test ve ultrasonik test (UT) gibi geleneksel tahribatsız muayene tekniklerinden X-ışını bilgisayarlı tomografi (XCT), faz dizi ultrasonik test (PAUT) ve lazer ultrasonik dahil olmak üzere gelişmiş NDT tekniklerine kadar çeşitli tahribatsız test teknikleri kullanılmıştır. X-ışını bilgisayarlı tomografi, parça iç kısımlarını yüksek çözünürlükte doğru bir şekilde görüntüleme

yeteneği nedeniyle, eklemeli imalat ile üretilmiş parçaları incelemek için kullanılan en önde gelen tekniktir. Bununla birlikte, Inconel 625 gibi yoğun alaşımlarda X-ışınları büyük ölçüde zayıflatılır ve bu da büyük numuneler için düşük kaliteli taramalara yol açar. Öte yandan UT, eklemeli imalat parçalarının kalite kontrolüne uygun, düşük maliyetli ve daha yüksek erişilebilirliğe sahip daha düşük çözünürlüklü bir alternatif sunar. Temel olarak mikroskop ve XCT görüntüleri ile, kalın numunelerdeki kusurları görüntülemek için 64 elemanlı 10 MHz lineer PAUT probu geliştirilmiştir. Prob, 0.25 mm aralıklı 0.2 mm genişliğinde ve toplam uzunluğu (açıklık) 16 mm olan elemanlardan oluşuyordu. UT, lazer toz yatak füzyon birleştirme sırasında oluşan kusur kümelerini tespit etmek için başarıyla uygulanmıştır. Ancak başarılı algılama, parça geometrisi için uygun bir UT teknolojisinin seçilmesine bağlıdır. PAUT, kalın bileşenlerdeki derin kusurları tespit etmek için uygundur. PAUT, kısmen kaynaşmış silindirik kusurları olan kalın dikdörtgen numuneleri incelemek için kullanılmıştır. Kusurların doğası, XCT taraması ve optik mikroskopi kullanılarak incelenmiştir. 0,25 mm'ye kadar inen kusurlar, kusur alanındaki lazer gücü önerilen seviyenin %25'i olduğunda tespit edilmiştir. Lazer gücü %50'ye ayarlandığında, daha düşük kusur yoğunlukları üretildi ve deneysel olarak sadece 2 mm'lik kusurlar tespit edilmiştir. Deneysel kusur görüntülerinin sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan görüntülerle karşılaştırılması, tane sınırlarından saçılmanın daha küçük kusurları gizlediğini ve bunların tam odaklama yöntemi görüntüleme kullanılarak tespit edilmesini engellediğini ortaya çıkarmıştır. PAUT, düz yüzeyli kalın parçaların muayenesi için uygunken, eğimli yüzeyli ince parçalarda kullanımı zordur. Kılavuzlu dalgalar, ince kavisli parçalar için çok uygundur. Karmaşık eğriliğe ve iç özelliklere sahip parçalarda yayılırlar. Sonuçlar, ultrasonik tekniklerin düz yüzeyli kalın parçaları ve karmaşık yüzeyli ince parçaları incelemek için kullanılabileceğini göstermektedir. PAUT yaklaşımı, ince yapılarda kılavuzlu dalgaları uyarmak ve almak için genişletilebilir ancak karmaşık yüzeylere sahip parçaları taramak için esnek faz diziler veya özel daldırma ayarları gerekmektedir.

Zhang ve diğ. [48] çalışmasında, faz dizi ultrasonik inceleme ve derin öğrenmeyi birleştirerek katmanlı kompozitlerdeki kırışıklıkları tespit etmeyi ve yerini belirlemeyi önermişlerdir. Bu modele dayanarak hem simülasyon hem de deneysel veriler yüksek verimlilikle başarılı bir şekilde tahmin edilebilir. Bu tür bir metodoloji, kompozitlerin ultrasonik incelemesinde sıklıkla karşılaşılan düşük sinyal gürültü oranı, rezonans

olmayan uyum ve yakın alan etkisi ile ilgili zahmetli analizi basitleştirir. Otomatik olarak verimli kırışıklık tespiti için sağlam bir temel sağlar. Katmanlı kompozitler, yüksek mukavemetleri, yüksek sertlikleri, düşük yoğunlukları ve diğer avantajları sayesinde havacılık, otomotiv ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretimde önemli ilerlemeler kaydedilmesine rağmen kompozit işleme sırasında katmanlara ayrılma, kırışıklıklar ve boşluklar gibi kusurlar hala kaçınılmazdır. Kırışıklık, katmanlı kompozitlerdeki yaygın kusurlardan biridir. Kesme kararsızlığı ve eksenel sıkıştırma nedeniyle, karmaşık geometrilerin katmanları sırasında yanlış hizalama ve istifleme hataları meydana gelebilir. Kompozit yapılarda oluşan buruşmalar mekanik özellikleri bozmakta ve kullanım ömrünü kısaltmaktadır. İçeride hiçbir ara katman ayrımı olmadan tanımlanmaları zordur. Kompozit malzemelerdeki fiber dağılımı, X-ışını bilgisayarlı tomografi ile gözlemlenebilir, ancak pahalıdır ve büyük ölçekli veya yerinde gerçek zamanlı inceleme için uygun değildir. Ultrason, hızlı tarama, uyarlanabilirlik ve taşınabilirlik nedeniyle endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ultrasonik test, yerinde veya çevrimiçi bir test yöntemi olarak geniş çapta kabul görmektedir. Lamine kompozit yapı, karbon kat ve cam kat katmanları için sırasıyla 0,14 mm ve 0,08 mm kalınlığında 126 katmana sahiptir. Deneyler sırasında 32 verici/alıcı elemanlı 5 MHz'lik bir prob seçilmiştir. Katmanlı kompozitlerde kırışık tespiti ve yerinin belirlenmesi evrişimli sinir ağı tabanlı yöntemle gerçekleştirilmiş ve otomatikleştirilmiştir. Fiziksel tabanlı model bazen gerçek yapılar için başarısız olabilir çünkü fiber yönü karmaşıktır ve kat özelliklerinin tam olarak eski haline getirilmesi zordur. Veriye dayalı yöntem, dış gürültüden kaynaklanan zorlukları, malzemenin kendisinin karmaşık yapısını ve ultrasonik faz dizi veri toplama sisteminin fiziksel sınırlamalarını ve doğrusal olmama durumlarını azaltır. Genellikle havacılık endüstrilerinde tasarlanan eğrilik veya köşe yapıları da kırışıklık analizini karmaşıklaştırır, dalga yayılma yolu artık daha güçlü zayıflama ile düz bir çizgi boyunca değildir. Derin öğrenme destekli ultrasonik NDT sayesinde, karmaşık donanım tasarımını ve önemsiz olmayan algoritmaları önleyerek üretim hattının otomatik olma potansiyelini belirtmişlerdir.

Sreeraj ve diğ. [49] çalışmasında, eklemeli imalat bileşenlerinde en sık görülen kusurların yanı sıra eklemeli imalat bileşenlerine uygulanabilen çeşitli tahribatsız değerlendirme yöntemlerine ve bunların bileşenlerin üretimi ve servisi sırasında oluşan kusurları tespit etme ve kontrol etme yeteneklerine genel bir bakış sağlamaktadır. Bu derleme makalesi,

eklemeli imalatla ilgili farklı kusur türlerine ve bunların özelliklerine ve etkilerine odaklanmaktadır. Görsel inceleme, sıvı penetrant testi, manyetik parçacık testi, radyografi, girdap akımı testi, ultrasonik test ve akustik emisyon gibi çeşitli NDE tekniklerini ve bunların kusurları tespit etmedeki uygulanabilirliği araştırılmaktadır. Eklemeli imalat sürecinde ve bileşenlerinde NDE tekniklerinin uygulanmasının zorluklarını ve sınırlamaları araştırılmaktadır. NDE, eklemeli imalat süreçlerinin izlenmesi ve kalite kontrolü için yıllardır uygulanmaktadır ve endüstrilerdeki talebi gösteren araştırma çalışmaları hala artmaktadır. Eklemeli imalatta NDE'nin uygulamaları, malzeme ve süreç kaynaklı kusurların analiz edilmesini ve miktarının belirlenmesini, malzeme özelliklerinin ve yüzey kalitesi özelliklerinin beyan edilmesini içermektedir. Eklemeli imalat ile üretilen parçalarının iç muayenesi için ultrasonik test, akustik emisyon, radyografik teknikler, termografik teknikler, bilgisayarlı tomografi, girdap akımı testi veya manyetik parçacık incelemesini içeren elektromanyetik teknikler kullanılabilir. Son zamanlardaki literatürlerin çoğunda, çevrimiçi denetimler için daha fazla geliştirme gerektiren eklemeli imalat süreçlerinde çeşitli tomografi ve radyografi türlerinin uygulamalarına odaklanmaktadır. Yazarlar, akustik emisyon ve ultrasonik sensörlerin çevrimiçi izleme için kullanılabileceğini ancak temassız uygulamalarda kullanılamayacağından bahsetmişlerdir.

Zhang ve diğ. [50] dalgalı kalın kompozitlerde delaminasyonu ve zengin reçineyi tespit etmek ve karakterize etmek için çok frekanslı bir ultrasonik yöntem önermiştir. Dalgalılık, çok katmanlı yapı ve çoklu kusur tiplerinin neden olduğu ultrasonik inceleme zorluklarını ele alan kalın dalgalı kompozitte ultrason yayılımı, OnScale®'de oluşturulmuş özel bir sayısal model aracılığıyla araştırılmıştır. Bu model aracılığıyla dalgalılığın ve kalın reçine katmanlarının, katlar arası yansıma sinyalinde bozulmaya ve dalga vektörü sapmasına neden olduğu ve dolayısıyla sadece sinyal/gürültü oranına dayalı olarak delaminasyon tespiti için zorluklar getirdiği bulunmuştur. 5 MHz'lik bir prob kullanılarak dalgalı kompozitte ultrasonik test deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. UT, kompozit yapılarda yüzey kırılması, yüzeye yakın ve yüzey altı kusurların tespiti için yaygın teknolojidir. Dalga zayıflaması ve frekans kayması gibi dalga özellikleri, kompozitlerin içindeki delaminasyonu ve gözenekliliği belirlemek için kullanılabilir. Bu çalışmada, çok katmanlı yapı ve çoklu kusur tiplerinin neden olduğu UT denetiminin zorlukları tanımlanmış ve ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Dahili delaminasyon ve zengin

reçine başarıyla tespit edilmiş ve karakterize edilmiştir. Deneysel sonuçlar, sayısal simülasyonla yakın bir uyum içindedir. UT bulguları, numunenin X-ışını görüntüleri kullanılarak da doğrulanmıştır.

Morozov ve diğ. [51] bu çalışmada, eş düzlemli kapasitif sensör kullanarak dokuma fiber CFRP'de darbe hasarının kapasitif tahribatsız görüntülemesini sunmaktadır. Panel içindeki yaygın hasar modları; delaminasyon (katların ayrılması), matris çatlaması ve lif kırılmalarıdır. Delaminasyon, reçine bileşeninde farklı lif yönelimli katlar arasında uzanan ve aynı kat grubundaki katmanlar arasında olmayan bir çatlaktır. Numuneler, 100 mm kenarlı ve 10 mm kalınlığa sahip CFRP dokuma kumaştan kare levhaları temsil ediyordur. Her numune, değişen yönlerde 25 kat dimi dokuma kumaşa sahiptir. Numunelerin referans NDT taramaları, bir ultrasonik faz dizi cihazı olan Olympus Omni Scan MX2 ve tekerlekli faz dizi probu olan RollerFORM (merkezi frekans 5 MHz, 64 eleman, eleman aralığı 0,8 mm) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kapasitif prob, numune yüzeyine paralel iki eş düzlemli dikdörtgen elektrottan oluşuyordur. Test edilen numuneler için optimum uyarma frekanslarının 200 MHz'in üzerinde olduğu bulunmuştur. Her numunede delaminasyonların net kapasitif görüntüleri elde edilmiştir. Darbelere bağlı delaminasyonların ultrasonik C-taramaları, delaminasyonların varlığını ve kapsamını doğrulamak için faz dizi tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Kapasitif görüntüleme tekniği, UT'nin yetersiz zaman alanı çözünürlüğüne sahip olduğu derinliklerde kompozit malzemelerdeki sığ kusurları görüntülemek için UT'yi tamamlayıcı olarak kullanılabilir.

Gaudenzi ve diğ. [52] alternatif tahribatsız tekniklerini birleştirerek, düşük hızlı darbelere maruz kalan kompozit yapı üzerinde oluşan etkileri araştırmaktadır. Elyaf kırılması, delaminasyonlar, matris çatlaması, temas nedeniyle plastik deformasyonlar ve büyük yer değiştirmeler, kompozit malzemeden yapılmış bir yapıya yabancı bir cisim çarptığında dikkate alınması gereken bazı etkilerdir. Bu nedenle, karbon elyafı ile güçlendirilmiş epoksi reçinenin lamine kompozit levha üzerindeki düşük hızlı etkisinin bir araştırması sunulmaktadır. İstifleme dizisinin ve darbe enerjisinin etkisi araştırılmıştır. Darbe testi, dikey bir ağırlık düşürme test makinesi ile gerçekleştirilir. Tahribatsız muayene yapılmış ve hasar miktarı alan bazında belirlenmiştir. Ultrasonik testin, optik termografinin ve sonik kızılötesinin performansları, zar zor görülebilen darbe hasarına sahip kompozit tabakaların incelenmesi için değerlendirilir. Test numuneleri, Roma'daki Sapienza

Üniversitesi Havacılık ve Uzay Kompozit Malzemeler Laboratuvarı'nda vakum torbalama tekniği ve otoklavda sertleştirme işlemi ile tek yönlü karbon fiberler ve epoksi reçineden yapılmıştır. Bu çalışmada ultrasonik faz dizi testi için; entegre yazılım ve 3,5 MHz'de (64 mm açıklık, 1 mm aralık, 7 mm yükseklik) 64 elemanlı doğrusal problu Olympus Omniscan MX-2 ve 10 MHz'de (32 mm açıklık, 0,5 mm aralık, 7 mm yükseklik) Multi 2000 Midas Sinus kodlayıcı ve 64 elemanlı problu Metalscan Tecnatom isimli iki farklı cihaz kullanılmıştır. Kusurlu bölgelerin tahribatsız muayenesi, yani kompozit delaminasyonların derinlik profilini, morfolojisini ve test nesnesinin tüm kalınlığı boyunca darbe hasarının yayılmasını iyileştirmek amacıyla kızılötesi termografi metodolojilerini tamamlamak için ultrasonik faz dizi kullanılmıştır. Sonuç olarak, kompozit tabakalar yapılmış ve farklı enerji seviyelerinde darbelendirilip kontrol edilmiştir.

Hsu çalışmasında [53] ultrasonik tahribatsız muayene yöntemlerinin, havacılık ve uzay kompozit yapıları için birincil muayene teknikleri olduğunu belirtmiştir. Ultrasonik parametreler ile kompozit malzemenin elastik ve mekanik özellikleri arasındaki yakın ilişkinin, ultrasonu kompozit yapılardaki kusurlar ve hasarlar için en etkili araştırma alanı haline getirdiğini söylemiştir. Geleneksel ultrasonik yöntemlerin önemini sürdüreceğini ve yeni ultrasonik test yöntemlerinin de ön plana çıkacağını öngörmektedir. Bu test yöntemleri, ultrasonik faz dizilerin ve lazer ultrasonun giderek yaygınlaşan kullanımını içerir. Ultrasonik olarak geçen bir dizinin ışını elektronik olarak yönlendirme ve odaklama yeteneği, daha yüksek tarama hızı ve görüntüleme kapasitesinin faydalarına ek olarak, anizotropik kompozitlerin muayenesinde belirgin avantajlara sahip olduğu sonucuna varmıştır. Lazerle üretilen ve algılanan ultrason teknolojileri, büyük ölçekli endüstriyel uygulamalar için gelişti. Havacılık ve uzay kompozit malzemeleri ve yapıları için ultrasonik tahribatsız muayene ilerlemesinin, hem alan-kusur etkileşiminin temel gelişiminde hem de uygulama ve uygulamanın teknolojik gelişiminde ilerlemesini beklediğini belirtmiştir.

Yu ve diğ. çalışmasında [54] elde ettiği deneysel sonuçlarla faz dizinin çatlak tipi hasarı tespit edebildiğini ve bunların alüminyum plakalardaki konumlarını gösterebildiğini belirtmiştir. Kılavuzlu dalga faz dizilerde dikkate değer ilerlemeler kaydedilmiş olmasına rağmen yapılması gereken önemli çalışmaların gerektiğini söylemiştir. Mevcut ışın oluşturma teorisi, monoton ve dağılmayan yönlendirilmiş dalgaların kullanımına

dayanmaktadır. Bununla birlikte, yönlendirilmiş dalgaların çok modlu ve dağıtıcı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, bu sınırlamaları gidermek için geliştirilmiş algoritmalara ihtiyaç olduğunu söylemiştir. Kılavuzlu dalgaların içsel karmaşıklığına yönelik, dağılım giderme veya dağılım dengeleme algoritmaları gibi bazı çözümler mevcuttur. Bu algoritmaların ışın şekillendirme sürecine eklenmesi için çalışmaların yapılabileceğine dikkat çekmiştir. Ayrıca uzay yapıları hem günümüzde hem de gelecekte kaçınılmaz olarak kompozittir. Çok yönlü dalga yayılımını varsayan faz dizi algoritmalarının güncellenmesi gerektiğini söylemiştir. Sadece element faktörünün değil aynı zamanda dalga hızının da dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir. Son olarak, hasarın erken bir aşamada tespit edilebilmesini sağlayacak şekilde iyileştirilmiş çözünürlükler elde etmek için sinyal analiz yöntemleri geliştirilebileceğine dikkat çekmiştir.

Wong çalışmasında [55] mekanik empedans, ultrasonik c-tarama ve kızılötesi tomografik olmak üzere 3 farklı tahribatsız muayene yöntemlerini kullanarak kompozit numuneleri incelemiştir. Ultrasonik c-tarama ile incelediği numunenin çapı 1 ila 11 mm arasında değişen çeşitli boyutlarda delaminasyon kusurları içermektedir. Bu kusurlar, test yüzeyinin altında 0,28 mm (2 kat prepreg) ile 2,8 mm (20 kat prepreg) arasında değişen çeşitli derinliklerde yeniden üretilmiştir. Her bir prepreg katmanı 0.14 mm idi. Kusurlar soyma kumaşından yapılmıştır. Her kusur, en azından üç katmanın her biri arasında bir hava boşluğunun mevcut olmasını sağlamak amacıyla birbirinin üzerine yerleştirilen üç soyma kumaşı katmanından oluşuyordu. 1 mm çapındaki yuvarlak bir kusur üretmenin zorluğu göz önüne alındığında kare olan 1 mm'lik kusur dışında tüm kusurlar yuvarlaktır. Numuneler ve prob suya batırılmıştır. Probdan gelen enerji numuneye girmeden önce suyun içinden geçerek prob ile numune arasında çok verimli bir enerji aktarımı sağlamıştır. Yüksek sönümlü 10 MHz frekanslı bir prob kullanılmış ve probdan gelen enerji, probun ön tarafındaki bir mercek ile numune üzerindeki küçük bir alana odaklanmıştır. Yapılan incelemelerde kusurların dairesel olduğu gözlemlenmiş ve odaklanmış prob, kusurların çaplarının oldukça hassas bir şekilde boyutlandırılmasına ve kusur şekillerinin belirlenmesine olanak sağlamıştır. Ultrasonik c-tarama kullanılarak tüm kusurların tespit edilebildiği ve kusurların derinliklerinin, boyutlarının ve şekillerinin belirlenebildiği elde edilmiştir. Ultrasonik c-taraması, temas maddesi gerektirir ve çok küçük alanları taramak için oldukça hızlıdır. Geniş alanlar, örneğin birkaç metrekare, tarama aralığı çözünürlüğüne bağlı olarak bir saat veya daha fazla sürebilir. C-tarama,

sağlam laminer (tabakalı) kompozitlerdeki delaminasyon (katman ayrılması) kusurlarına ve bal peteği yapılarındaki kopmalara karşı duyarlı olma avantajına sahiptir. Ultrasonik c-tarama, 1'den 11 mm'ye kadar 2,8 mm derinliğe kadar tüm kusurları tespit edebilen en hassas teknik olmuştur. Ultrasonik c-taramasının, kusur derinliği ölçümü için en doğru teknik olduğu ve hangi iki katlı katmanda var olduğu açısından delaminasyon kusurunun konumunu belirleyebileceği sonucuna varılmıştır.

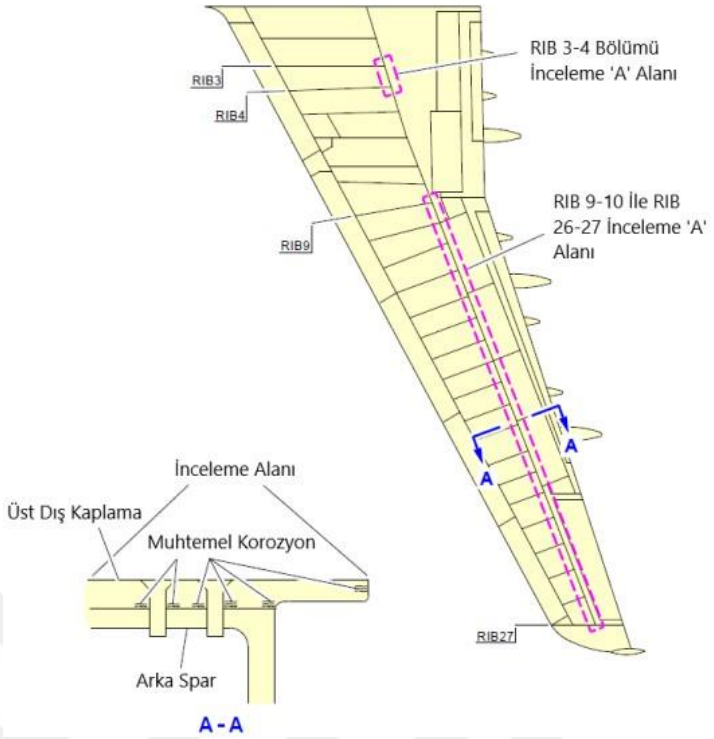
5. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

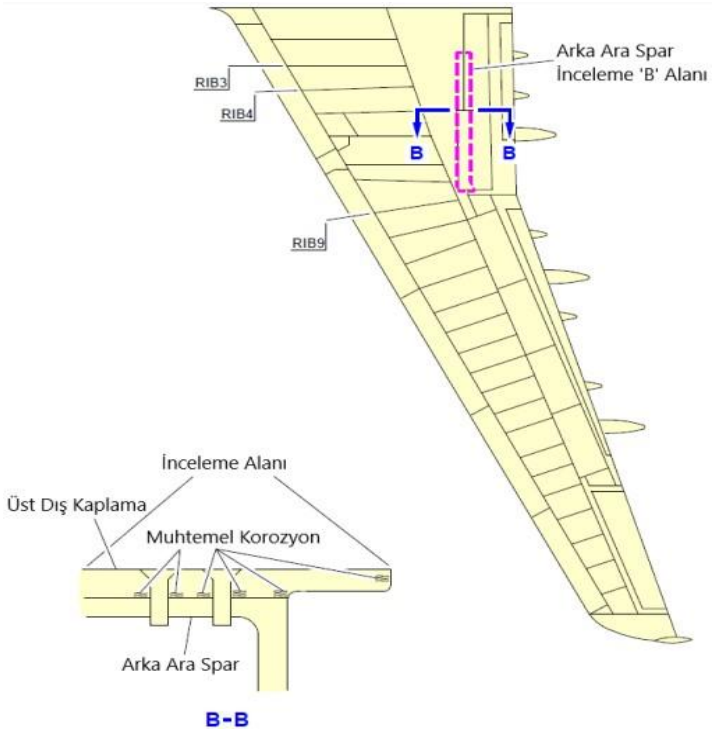
Bu çalışmada; günümüzde ticari hava aracı olarak kullanılan uçaklarda bulunan kritik yapılarda oluşan yapı kusurları, geleneksel ultrasonik muayene yöntemi ve faz dizi ultrasonik muayene yöntemi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Yapılan ön incelemeler sonrasında üç farklı yapıda kusur tespit edilmiştir. Bunlardan ilki Airbus A320 yolcu uçağı kanadının firar kenarı ile arka spar ve arka ara sparın ön bağlantı sırası arasındaki kanat üst dış kaplamasının muayenesi sırasında bağlantı yuvalarında tespit edilen korozyondur. İkinci olarak, Airbus A320 yolcu uçağının kanat yapısında bulunan spoiler bağlantı parçasında metal yorulmasından dolayı kaynaklanan yorulma çatlağıdır. Üçüncü olarak ise A320 yolcu uçağının iniş takımının rib5 ile bağlantı noktasında bulunan bağlantı kulakçıklarında oluşan yorulma çatlağıdır. Bu bölümde; inceleme gerçekleştirilen uçak yapıları, incelemelerde kullanılan cihazlar ve incelenen yapılara uygulanan tahribatsız muayene ve prosedürlerinden bahsedilecektir.

5.1. İnceleme Yapılan Yapılar

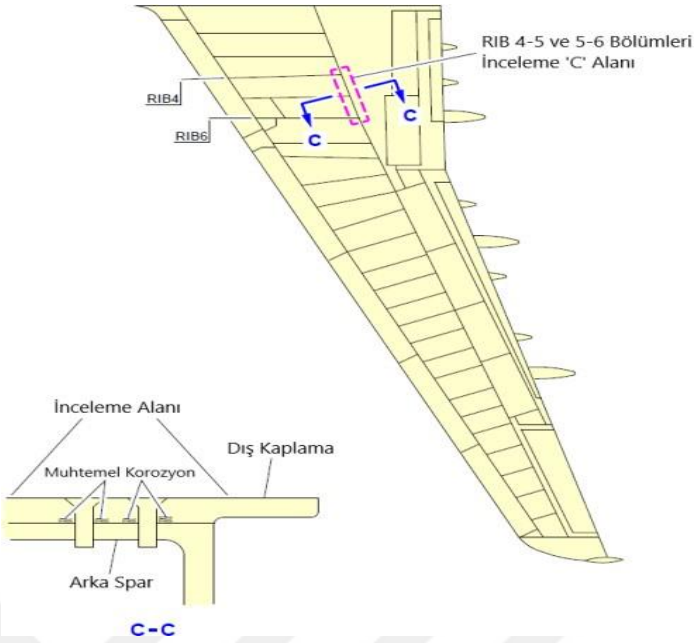
Yapılan incelemelerde, yapı kusuru incelemesi yapılan üç farklı uçak yapısı bulunmaktadır. İlk olarak uçağa aerodinamik bütünlük sağlayan dış kaplamalarda korozyon incelemesi yapılmıştır. Firar kenarı ile arka spar ve arka ara spar ön bağlantı sırası arasındaki üst kanat dış kaplamasının muayenesi kapsamında incelenen yapılar ve uçak kanadı üzerindeki konumları Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Uçak üreticisi tarafından belirlenen üç farklı inceleme alanı bulunmaktadır. A alanı, firar kenarı ile rib 3-4 ve rib 9-10 ila 26-27 bölümleri arası arka sparın ön bağlantı elemanı sırasında incelenen bölgeyi temsil etmektedir. B alanı, firar kenarı ile arka ara sparın ön bağlantı elemanı sırasında incelenen bölgeyi temsil etmektedir. C alanı ise rib 4-5 ve 5-6 bölmelerindeki arka sparların ön bağlantı elemanı sırası ile arka bağlantı elemanı sırası arasında incelenen bölgeyi temsil etmektedir.



Şekil 5.1. İnceleme yapılan 'A' alanı [56]



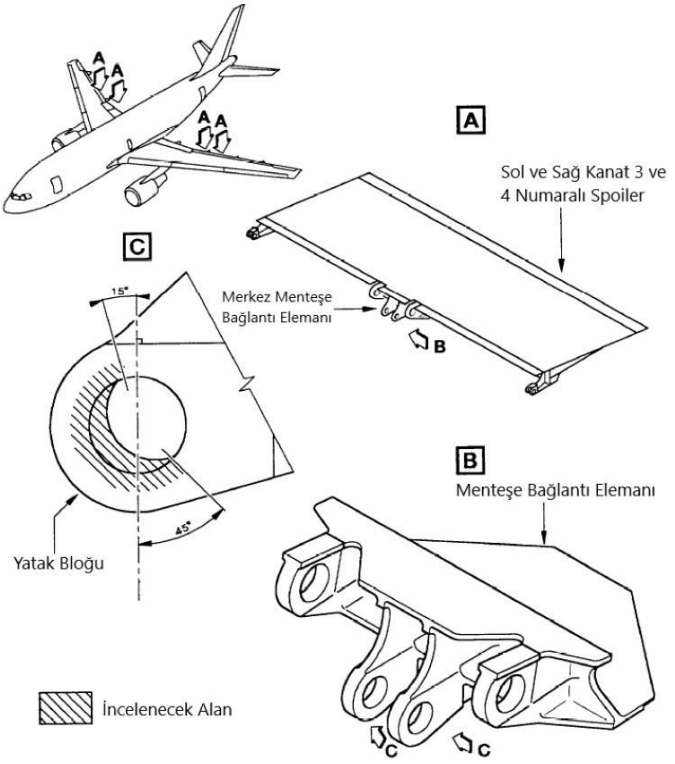
Şekil 5.2. İnceleme yapılan 'B' alanı [56]



Şekil 5.3. İnceleme yapılan 'C' alanı [56]

İkinci olarak uçak kanat üstü konumunda bulunan ve çeşitli görevleri bulunan spoiler yapısında yorulma çatlağı incelemesi yapılmıştır. Sol ve sağ kanatlardaki 3 ve 4 numaralı spoilerin, merkez menteşe bağlantı elemanı yatak bloğunda yorulma çatlağı tespiti için incelenen yapı ve kanat üzerindeki pozisyonu Şekil 5.4'te gösterilmiştir.

a)

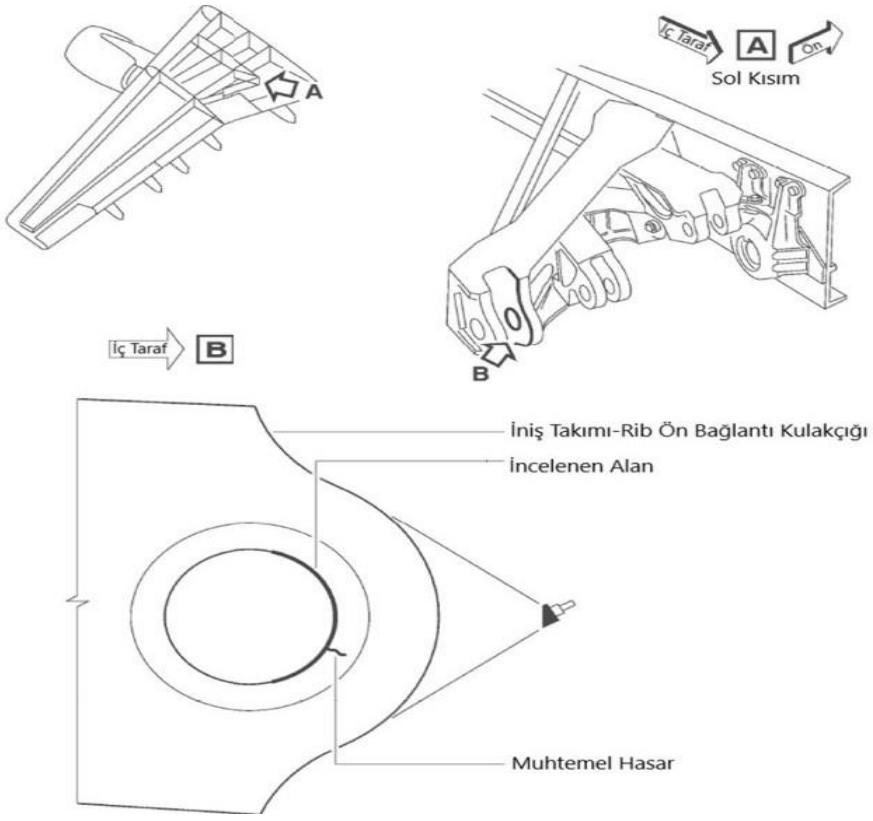


b)



Şekil 5.4. İnceleme yapılan spoiler parçası; (a) incelenen yapının teknik çizimi, (b) incelenen yapının kanattaki görüntüsü [57]

Üçüncü olarak uçak kanat altında yer alan iniş takımında incelemeler yapılmıştır. Sol ve sağ kanat ana iniş takımının rib5 ileri bağlantı kulakçığı incelenmiştir. İncelenen yapı ve bu yapının uçak üzerindeki yeri Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. İnceleme yapılan iniş takımı ile rib5 bağlantı parçası [58]

5.2. İncelemelerde Kullanılan Cihazlar

Bu çalışma sırasında uçak yapılarının kusur tespit incelemesi için faz dizi ultrasonik muayene cihazı, geleneksel ultrasonik muayene cihazı, düz ve açılı problar, problarla uyumlu takozlar ve uygun bir temas maddesi kullanılmıştır. Tahribatsız inceleme sonuçlarını elde etmek için kullanılan cihaz ve tertibatları, cihazlara ait özellikler ve inceleme detayları aşağıdaki alt başlıklarda ifade edilmiştir.

5.2.1. Faz Dizi Ultrasonik Muayene Cihazı

Uçak yapılarında oluşan kusurların tespiti için kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinden biri olan faz dizi ultrasonik muayene yönteminde kullanılmak üzere OLYMPUS şirketi tarafından üretilen OmniScan MX modeli NDI cihazı yapılan incelemelerde kullanılmıştır. Kullanılan OmniScan MX modeli NDI cihazı Şekil 5.6'da cihazın özellikleri ise Tablo 5.1.'de verilmiştir.



Şekil 5.6. OmniScan MX taşınabilir NDI ölçüm cihazı

Tablo 5.1. OmniScan MX taşınabilir NDI cihazı özellikleri.

Özellikler	**Değerler**
Genel boyutlar	321 mm x 209 mm x 125 mm
Ağırlık	4,6 kg
Depolama aygıtları	CompactFlash® kartı, çoğu standart USB depolama aygıtı veya hızlı internet aracılığıyla Dahili 32 MB DiskOnChip®
Veri dosya boyutu	160 MB
USB port sayısı	3
Hoparlör çıkışı	Var
Mikrofon girişi	Var
Video çıkışı	SVGA
Video girişi	NTSC/PAL
İnternet	10/100 Mb/s
Güç çıkış hattı	5V, 500mA güç çıkış hattı (kısa devre korumalı)
Ekran boyutu	8,4 inç
Çözünürlük	800 x 600 piksel
Renk sayısı	16 milyon
Ekran tipi	TFT LCD
Batarya tipi	Akıllı lityum-iyon pil
Batarya sayısı	1 veya 2
Batarya ömrü	Normal çalışma koşullarında batarya başına minimum 3 saat
DC giriş voltajı	15 V – 18 V(minimum 50 W)
Çalışma sıcaklığı	0°C ila 40°C arası
Depolama sıcaklığı	-20°C ile 70°C arası

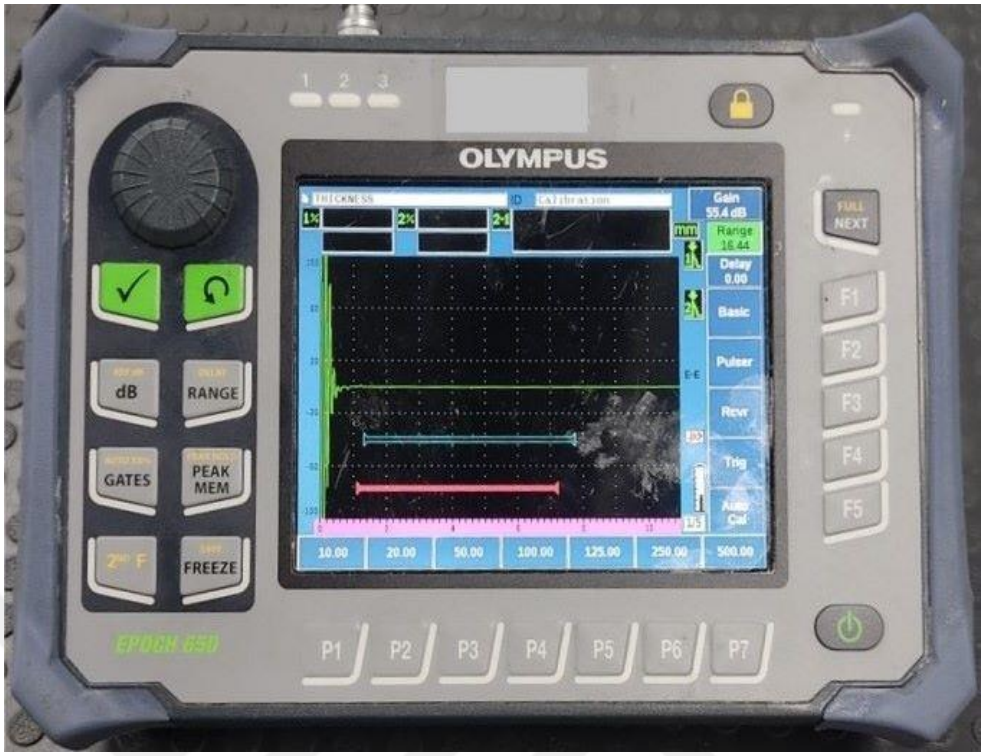
Faz dizi ultrasonik muayenede kullanılan OmniScan MX modeli NDI cihazı faz dizi modülü özellikleri aşağıdaki Tablo 5.2.'de yer verilmiştir.

Tablo 5.2. OmniScan MX taşınabilir NDI cihazı faz dizi modülü özellikleri.

Özellikler	**Değerler**
Genel boyutlar	244 mm x 182 mm x 57 mm
Ağırlık	1,2 kg
Prob tanıma	Otomatik prob tanıma ve kurulumu
Sinyal verici/alıcı açıklığı	16 eleman
Sinyal verici/alıcı eleman sayısı	128 eleman
Sinyal verici voltajı	80 V
Sinyal genişliği	30 ns ila 500 ns arasında ayarlanabilir, 2,5 ns çözünürlük
Sinyal düşme zamanı	10 ns'den az
Verici çıkış empedansı	25 Ω'dan az
Alıcı kazancı	0-74 dB maksimum giriş sinyali
Alıcı giriş empedansı	75 Ω
Alıcı sistem bant genişliği	0,75-18 MHz (-3dB)
Tarama tipi	Azimut (S-tarama) ve doğrusal
Aktif eleman sayısı	16
Eleman sayısı	128
Veri sayısallaştırma frekansı	100 MHz (10 bit)
Maksimum sinyal oranı	10 kHz'e kadar (C-taraması)
A-tarama yenileme hızı	Gerçek zamanlı: 60 Hz
Düzeltilmiş S-tarama	40 Hz'e kadar

5.2.2. Geleneksel Ultrasonik Muayene Cihazı

Uçak yapılarında kusurların tespiti için kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinden biri olan ultrasonik muayene yönteminde kullanılmak üzere OLYMPUS şirketi tarafından üretilen EPOCH 650 modeli NDI cihazı yapılan incelemelerde kullanılmıştır. Kullanılan EPOCH 650 modeli NDI cihazı Şekil 5.7'de; cihazın özellikleri ise Tablo 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.7. EPOCH 650 taşınabilir NDI ölçüm cihazı

Tablo 5.3. EPOCH 650 taşınabilir NDI cihazı özellikleri.

Özellikler	**Değerler**
Genel boyutlar	236 mm x 167 mm x 70 mm
Ağırlık	1,6 kg (lityum-iyon batarya dahil)
Veri depolama	Çıkarılabilir 2 GB microSD™ kart
Batarya tipi	Standart şarj edilebilir tek lityum-iyon
Batarya ömrü	15 saat ile 16 saat arası (lityum-iyon)
Ekran tipi	Tam VGA (640 x 480 piksel) transreflektif renkli LCD, 60 Hz güncelleme hızı
Ekran boyutları	117 mm x 89 mm x 146 mm
Sinyal genişliği	PerfectSquare™ teknolojisiyle 25 ns ila 5.000 ns (0,1 MHz) arasında ayarlanabilir
Alıcı kazancı	0 ila 110 dB arası
Alıcı giriş empedansı	400 Ω ± 5%
Alıcı bant genişliği	–3 dB'de 0,2 MHz ila 26,5 MHz

Çözünürlük	%0,25 (tam ekran yüksekliği)
Genlik ölçümü	%0,25 çözünürlükle %0 ila %110 tam ekran yüksekliği
Otomatik kalibrasyon	Hız, düz ışın ve açılı ışın
Test modları	Darbe Yankı, Çiftli veya İletim Yoluyla
Aralık	3,36 mm ile 13,388 mm arası
Hız	635 m/s ile 15240 m/s arası
Kırılma açısı	0,1°'lik artışlarla 0° ila 90°
Çalışma sıcaklıkları	-10°C ile 50°C arası
Batarya depolama sıcaklıkları	0°C ile 50°C arası

5.2.3. Ultrasonik Tahribatsız Muayene Probları

Faz dizi ultrasonik test ve geleneksel ultrasonik muayene yöntemlerinde incelenecek olan malzemenin geometrik şekline göre çeşitli problar bulunmaktadır. Bu problar, genellikle açılı prob veya düz prob olarak da bilinmektedir. İncelenen malzeme düz bir şekle sahip ise düz prob tercih edilirken kavisli geometrik şekle sahip olan malzemelerde ise açılı prob tercih edilir. Düz problara örnek olarak temas dönüştürücüsü ve gecikme hattı dönüştürücüsü verilebilir. Genellikle boyuna dalga üreterek test parçasıyla doğrudan temas halinde bulunurlar. Düz problarla; kalınlık ölçümü, delaminasyon tespiti ve bağlantı cıvatalarında çatlak kontrolü gibi işlemler yapılabilmektedir. Açılı problar bir takozla beraber kullanılırlar. Bu problar incelenen parçaya istenilen açıda boyuna veya enine dalga gönderen dönüştürücülerdir. Açılı problar kullanılarak korozyon haritalandırma ve kavisli şekilli parçalarda yorulma çatlağı kontrolü yapılabilmektedir. Uçak yapılarına uygulanan ultrasonik tahribatsız kusur tespiti sırasında kullanılan problar, problara uyumlu takozlar ve kullanılan temas maddesi hakkında detaylı teknik açıklamalar bu kısımda yapılmıştır.

Değiştirilebilir bir gecikme hattı dönüştürücüsü, değiştirilebilir bir gecikme hattıyla kullanılmak üzere özel olarak tasarlanmış tek elemanlı bir geniş bant temas probudur. V201-RM parça numaralı gecikme hattı kalınlık ölçüm probu; gecikme hattının kullanımıyla birlikte dönüştürücü, yüzeye yakın mükemmel çözünürlük sağlar. Daha yüksek dönüştürücü frekansı çözünürlüğü artırır. Doğrudan temas yöntemini kullanarak ince malzemeleri ölçme veya küçük kusurları bulma yeteneğine sahiptir. Kavisli

parçalara uyacak şekilde şekillendirme mevcuttur. Bu dönüştürücülerin kullanımıyla hassas kalınlık ölçümü, düz ışın kusur tespiti ve sınırlı temas alanına sahip parçaların muayenesi yapılabilmektedir. Şekil 5.8'de V201-RM gecikme hattı kalınlık ölçüm probu, 5 MHz frekans değeri 6 mm normal eleman boyutuna sahiptir.



Şekil 5.8. V201-RM gecikme hattı kalınlık ölçüm probu

Olympus'un RollerFORM™ ticari isimli faz dizi tekerlekli probu; kompozitlerin ve diğer pürüzsüz yüzeyli malzemelerin muayenesine yönelik olarak tasarlanmıştır. Tam iki boyutlu sinyal kodlama sistemleri için uygun maliyetli ve uygulaması kolay bir alternatif olan RollerFORM tarayıcı, daldırma tekniklerine uygun bir alternatiftir. RollerFORM lastiğinin benzersiz malzemesi, yüksek kaliteli daldırmaya benzer ultrasonik testler sağlar. Zorlu tarama konumlarında bile mükemmel bağlantı ve güçlü bir sinyal elde etmek için minimum düzeyde temas maddesi ve basınç gerekir. RollerFORM prob 51,2 mm veya 128 mm ışın genişliğine sahip iki boyutta sunulmaktadır. Mükemmel akustik performans sağlar. 50 mm kalınlığa kadar kompozitlerin muayenesine olanak sağlar. Mevcut uçak üreticisi prosedürlerine uygun olarak kullanılabilir. RollerFORM tarayıcı, OmniScan kusur dedektörüyle birlikte üretim ve bakım denetimleri için sıfır dereceli ultrasonik ışınlar kullanır. Ergonomik olarak tasarlanmış RollerFORM tarayıcı, entegre indeksleme düğmesiyle birden fazla tek satırlı C-taraması elde ederek ve bunları gerçek zamanlı olarak tek bir görüntüde birleştirerek incelenen malzemenin yüzeyini haritalandırmaya olanak tanır. Bu problar kullanılarak çok çeşitli malzemelerde kusur tespiti ve kalınlık ölçümü yapılabilir. RollerFORM prob; 5 MHz faz dizi hızlı tarama frekansı, 50 mm tekerlek probu, 64 eleman, 0,8 mm eleman aralığı, 5 metre bağlantı kablosu içerir. RollerFORM prob Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

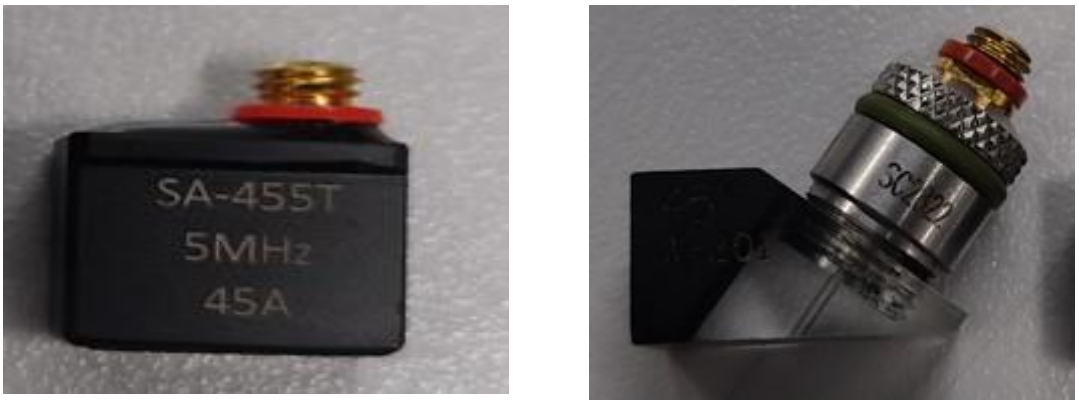
a) b)



Şekil 5.9. RollerFORM faz dizi tekerlekli probu; (a) prob boyutları, (b) RollerFORM prob [56]

SA-455T özel ultrasonik tahribatsız muayene dönüştürücüsü; 5 MHz frekans, 45 derece açılı, 6 mm genişlik ve maksimum 12 mm uzunluğunda bir kasaya sahiptir. GE SC2822 parça numaralı açılı prob, 5 MHz frekans ve 6 mm genişliğe sahiptir. Prob tertibatı, W201 parça numaralı plastik bir takozla bağlantılı haldedir. W201 parça numaralı takoz, kimyasal ismi akrilik ve ticari ismi ise LUCİTE olarak geçen polimetil metakrilat malzemedir. LUCITE takoz; 6 mm dönüştürücü (18 mm x 12 mm x 8 mm) ile alüminyumlarda kullanılan 45° enine dalga takozudur. Bu iki prob Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

a) b)



Şekil 5.10. Kullanulan açılı problar; (a) SA-455T ultrasonik dönüştürücü, (b) SC2822 ultrasonik dönüştürücü

10L32-A1 açılı probu; 10 MHz faz dizi frekansı, 32 eleman, 0.31 mm eleman aralığı, 17 mm x 29 mm x 25 mm dış boyutlara sahiptir. Prob tertibatı, MWUX1214A plastik takozla bağlı haldedir.



Şekil 5.11. 10L32-A1 ultrasonik dönüştürücü

Waygate Teknoloji'nin ürettiği ZG-F ultrasonik temas maddesi içerisinde etilen glikol ve sodyum nitrit bulundurmaktadır. Temas maddesinin pH değeri 9, kaynama noktası 100 °C, 20 °C ortam sıcaklığında yoğunluğu 1,00 g/ml ve gaz basıncı 16,49 mbar ve temas maddesi kullanım sıcaklığı aralığı -20 °C ile +100 °C arasındadır.

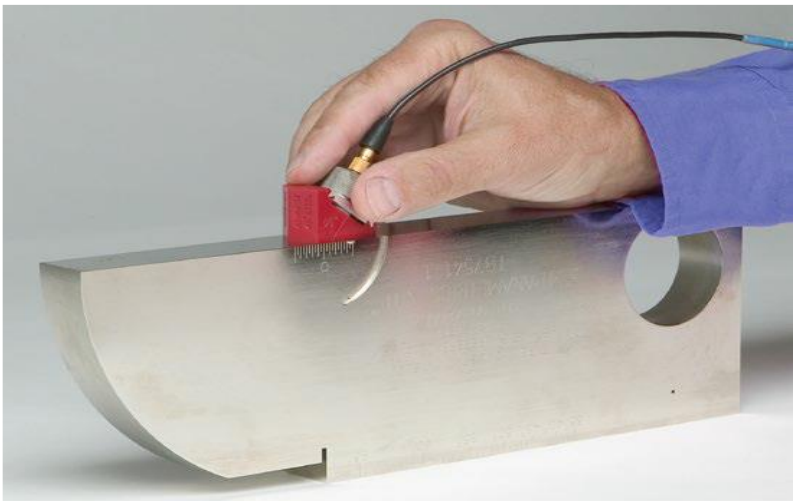
5.2.4. Kalibrasyon Blokları

Ultrasonik muayenede cihazı ayarlamak ve olması muhtemel kusurların önceden belirtilmiş hassaslıkta bulunup bulunmayacağını tespit için referans standartları ile bir kalibrasyon işlemi gerekir. Ultrasonik referans standartları, muayene sırasında bulunacak kusurların yaklaşık özelliklerine sahip olacak şekilde yapıldıkları için ilk ayarı kolaylaştırırlar ve yeterli hassaslıkta standart bir ölçümün yapılıp yapılmadığını gösterir. Bu amaçla kalibrasyon işleminin gereklerini sağlayan, çeşitli kalibrasyon blokları kullanılır. Referans standartları için malzeme; muayene edilecek parça ile kimyasal bileşim, ısıl işlem, fiziksel ve mekanik karakteristik, şekil ve geometri olarak eşdeğer olmalıdır. Özellikle kenar etkisini yok etmek için yeterli büyüklükte olmalıdır. Eğeleme, kesme, delme, frezeleme, kazıma, keskileme ve oyma ile uzunlamasına veya dairesel çentiklere, çatlaklara, delinmiş deliklere, eğe kesiklerine, çukurlara, vuruklara, çukurcuk korozyona ve taneler arası korozyona benzer süreksizlikler meydana getirilir. Referanstaki suni kusurlar, muayene parçasındaki kusurların muhtemel tipine ve tiplerine mümkün olduğunca çok benzemelidir. Bu cihazın hassaslığının sağlanması ve kullanılacak en iyi tekniğin saptanması için zaruridir. Muayeneden önce bir referans standarttın olması utrasonik muayene için çok önemlidir. Çoğunlukla kusurun yeri ve tipi tahmin edilebilir ve bir referans standart meydana getirilebilir. Cihazlar geniş bir

hassaslık aralığı için dizayn edilip, değişik tipte ve kalınlıkta malzeme için doğru duyarlılığın ayarı muayenede çok önemlidir. Duyarlılık çok küçük ise zararlı kusurlar bulunmayabilir, tersine çok yüksek ise doğal malzeme karakteristikleri yanlış teşhisle kusur sanılabilir.

5.2.4.1. I.I.W. Kalibrasyon Bloğu (V1 Blok)

I.I.W. olarak adlandırılan V1 bloğu, Uluslararası Kaynak Enstitüsü (IIW) tarafından açıklanan ve Uluslararası Standart Organizasyonu (ISO) tarafından önerilen orta karbonlu ferritik ve normalleştirilmiş çelikten yapılmış çok yönlü bir kalibrasyon bloğudur. Bu blok kullanılarak; normal ışın probları ile 25 mm, 100 mm ve 200 mm kalınlık ve açılı ışın probları için 100 mm çeyrek daire kullanılarak zaman tabanının kalibrasyonu, 100 mm kadran kullanılarak prob indeksinin belirlenmesi, plastik takoz ve bloğun yan tarafına damgalanmış dereceler kullanılarak prob açısının belirlenmesi, ultrasonik kusur dedektörünün; zaman tabanı doğrusallığı, ekran yüksekliği doğrusallığı, genlik kontrol doğrusallığı, çözümleme gücü, nüfus etme gücü, yatay doğrusallık, ölü bölge kontrolü, darbe uzunluğu gibi performans özelliklerinin kontrol edilmesi, hassasiyetin ayarlanması ve farklı akustik hızları nedeniyle çeşitli malzemelerin karşılaştırılması yapılabilir [38].



Şekil 5.12. V1 kalibrasyon bloğu [38]

5.2.4.2. Minyatür Açı-Işın Bloğu (V2 Blok)

Uluslararası Kaynak Enstitüsü tarafından tanımlanan V2 bloğu; V1 bloğunun saha kullanımına uygun daha kompakt bir şekilde olan ancak işlevi açısından bakıldığında bu bloğun çok yönlülüğü daha azdır. Özellikle kısa yakın alan uzunlukları ve küçük çaplı

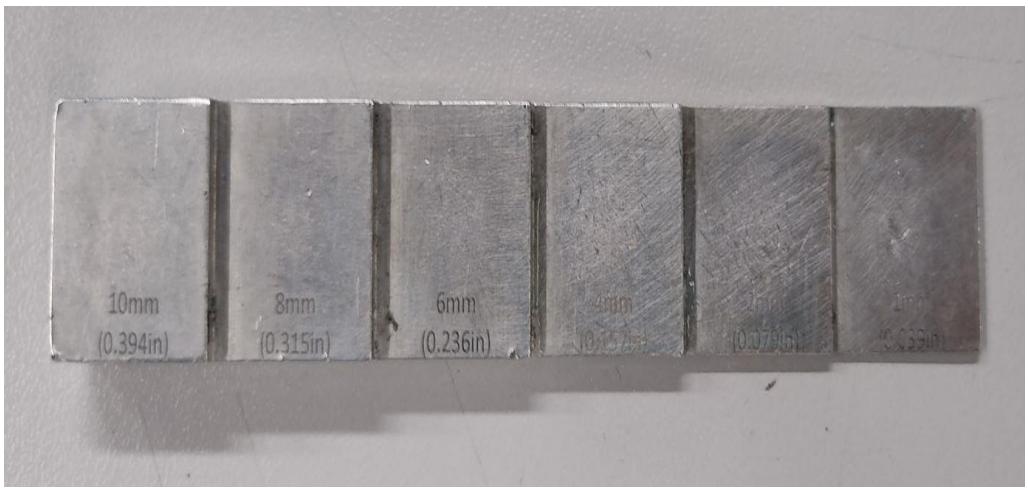
normal ve açılı probların zaman bazlı kalibrasyonu için uygundur. Bu kalibrasyon bloğu, boyutları milimetre cinsinden olan çelikten yapılmıştır. Bu kalibrasyon bloğu yarıçapı 25 mm ve 50 mm olan iki çeyrek daire içerir. Bloğun kullanım alanları; açılı ışın probunun karakteristiğinin kontrol edilmesi, ultrasonik aletlerin zaman tabanının kalibrasyonu, prob indeks noktası, ışın açısı ve metal mesafe kalibrasyonunu içermektedir [38].



Şekil 5.13. V2 kalibrasyon bloğu [38]

5.2.4.3. Kalınlık Blokları

Kademeli kalınlık blokları veya konik test blokları, kalınlık ölçümü için ultrasonik ekipmanı kalibre etmek amacıyla kullanılır. Bu bloklar, incelenen malzemeye benzer malzemeden dikkatli bir şekilde taşlanır ve çeşitli konumlardaki tam kalınlıklar blok üzerinde işaretlenir [38].



Şekil 5.14. Kademeli kalınlık kalibrasyon bloğu

5.3. İncelenen Yapılara Uygulanan Tahribatsız Muayene ve Prosedürleri

Yukarıda bulunan bölüm 5.1.'de, inceleme yapılan alanların belirtildiği uçak yapıları verilmiştir. Bu bölümde ise bu yapılara uygulanan incelemelerde kullanılan tahribatsız muayene yöntemleri ve prosedürlerinden ve cihaz kalibrasyonlarından bahsedilecektir.

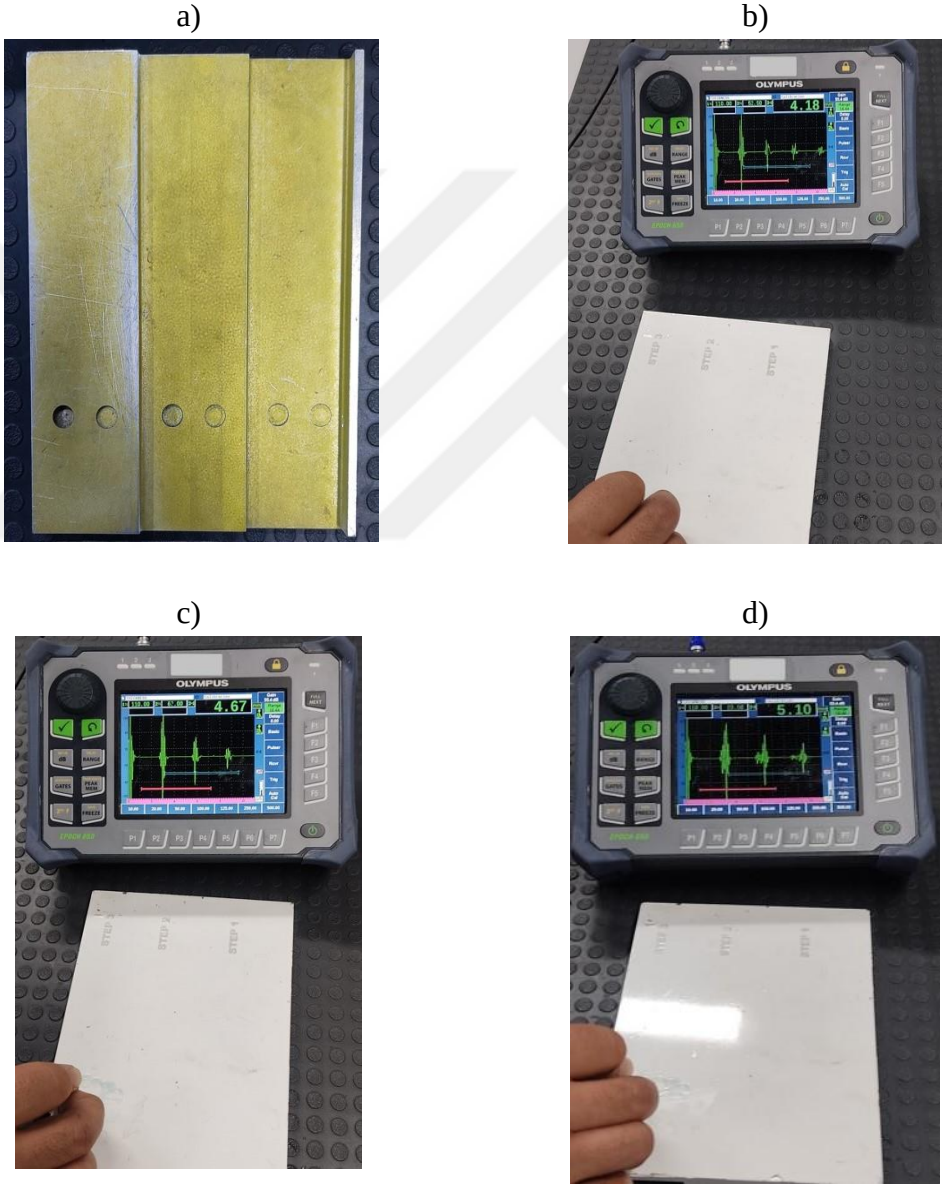
5.3.1. Firar Kenarı ile Arka Spar ve Arka Ara Spar Ön Bağlantı Sırası Arasındaki Üst Kanat Dış Kaplamasının Muayenesi

Bu muayene için NTM 57-29-07-270-801-A01 referans alınmıştır. Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3.'te gösterilen inceleme alanlarına, faz dizi ultrasonik muayene yöntemi uygulanarak bölgelerin korozyon haritalandırılması yapılmıştır. Bu muayene sırasında; referans blok, kademeli kalınlık kalibrasyon bloğu, faz dizi modülü takılı OmniScan MX taşınabilir NDI ölçüm cihazı, EPOCH 650 taşınabilir NDI ölçüm cihazı,V201-RM gecikme hattı (delay line) kalınlık ölçüm probu, RollerFORM faz dizi tekerlekli probu ve ZG-F ultrasonik temas maddesi kullanılmıştır. İlk olarak EPOCH 650 taşınabilir NDI ölçüm cihazı bu muayenede kullanılmak üzere denenmiştir. Bu geleneksel ultrasonik yöntem cihazı, Şekil 5.14'te bulunan kademeli kalınlık kalibrasyon bloğunda kalibre edilmiştir. Kademeli kalınlık kalibrasyon bloğu yüzeyine temas maddesi sürülerek blok üzerinde farklı seviyelerde bulunan kalınlıklar, V201-RM gecikme hattı (delay line) kalınlık ölçüm probu kullanılarak ölçülmüştür. Bu kalınlıklar sırasıyla 1 mm, 2 mm ve 4 mm seviyeleridir. Aşağıda bulunan Şekil 5.15'te cihazdan okunan sinyal değerleri görülmektedir. Kalibrasyon bloğunun ölçülen mesafesi 4 mm olarak tam doğrulukta bulunmuştur.



Şekil 5.15. EPOCH 650 taşınabilir NDI ölçüm cihazında alınan sinyal değeri

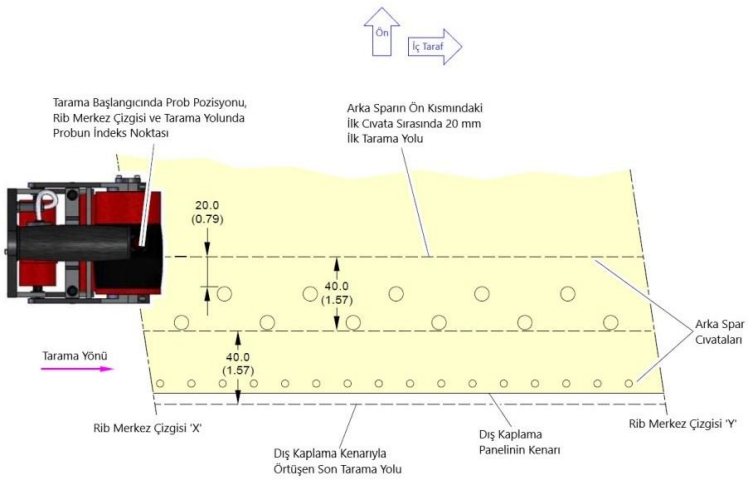
Daha sonra ise farklı bir referans bloğu kullanılarak EPOCH 650 taşınabilir NDI ölçüm cihazında kalınlık ölçümleri yapılmıştır. Bu referans bloğu farklı kalınlıkları olan üç kademeden oluşmaktadır. Her bir kademeyi ortalayacak şekilde temsili bağlantı parçası yuvası bulunmaktadır. Her bir kademeye temas maddesi sürülmüştür. V201-RM gecikme hattı (delay line) kalınlık ölçüm probu kullanılarak kalınlık ölçümleri tamamlanmıştır. Okunan sinyal değerleri aşağıdaki Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



Şekil 5.16. Referans bloğu ve alınan sinyaller; (a) referans bloğu, (b) ilk alınan sinyal, (c) ikinci alınan sinyal (d) üçüncü alınan sinyal

5.3.1.1. İnceleme Hazırlığı

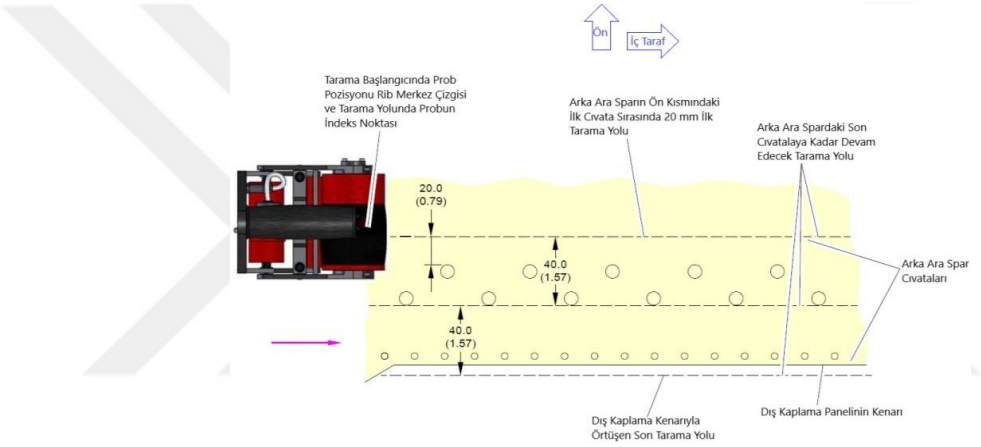
Bu bölümde ise OmniScan MX taşınabilir NDI ölçüm cihazında RollerFORM faz dizi tekerlekli probu kullanılarak incelemeler yapılmıştır. Tarama alanlarındaki boya tabakası, kabarcık veya pullanma olmasına karşın incelenmiştir. Tüm etiketler ve yapışan diğer maddeler inceleme alanından çıkarılmıştır. Muayene alanına gözle görülür herhangi bir hasar veya süreksizlik olmadığına dair gözle inceleme yapılmıştır. Onaylı bir işaretleyici (marker) kullanılarak kanat riblerinin ve arka sparın merkez çizgisi işaretlenmiştir. Rib bölmesinin tanımlanmasına olanak sağlamak için kanat rib ve arka spar ara yüzeyi belirlenmiştir. Şekil 5.1'de gösterilen inceleme 'a' alanında bulunan arka sparın ilerisindeki ön bağlantı elemanı sırası tespit edilip ilk ve son bağlantı elemanı belirlenmiştir. Bağlantı elemanı sırasının ilk bağlantı elemanı baş kısmının ön kenarından 20 mm ölçülmüştür ve konumu onaylı bir işaretleyici ile işaretlenmiştir. Bağlantı elemanı sırasının son bağlantı elemanı baş kısmının ön kenarından 20 mm ölçülmüştür ve konumu onaylı bir işaretleyici ile işaretlenmiştir. Metalik olmayan bir cetvel ve onaylı bir işaretleyici kullanılarak işaretli konumlar arasında ribler arası bir çizgi çizilmiştir. İşaretli çizginin arkasından dış kaplamanın firar kenarına doğru 40 mm tarama yolu aralıkları ölçülmüştür. Onaylanmış bir işaretleyici kullanarak kalan tarama yolları da işaretlenmiştir. Son tarama yolu firar kenarı dış kaplaması kenarıyla örtüştürülmüştür. Bu işlem inceleme 'a' alanında bulunan tüm riblere uygulanmıştır.



Şekil 5.17. İnceleme 'A' alanı tarama yolları [56]

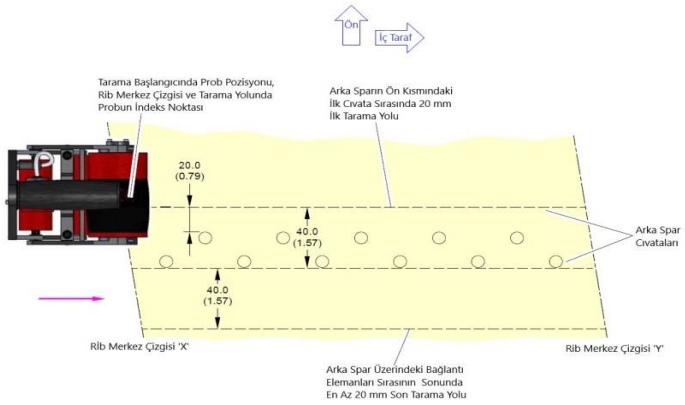
Şekil 5.2'de gösterilen inceleme 'b' alanında bulunan arka ara sparlar tespit edilmiştir. Arka ara sparın ilerisindeki ön bağlantı elemanı sırası bulunup ilk ve son bağlantı elemanı

belirlenmiştir. Bağlantı elemanı sırasının ilk bağlantı elemanı baş kısmının ön kenarından 20 mm ölçülmüştür ve konumu onaylı bir işaretleyici ile işaretlenmiştir. Bağlantı elemanı sırasının son bağlantı elemanı baş kısmının ön kenarından 20 mm ölçülüp konumu onaylı bir işaretleyici ile işaretlenmiştir. Metalik olmayan bir cetvel ve onaylı bir işaretleyici kullanarak işaretli konumlar arasına çizgiler çizilmiştir. Dış kaplamanın firar kenarındaki işaretli çizginin arkasında 40 mm tarama yolu aralıklarını ölçülmüştür. Onaylanmış bir işaretleyici kullanarak kalan tarama yolları işaretlenmiştir. Son tarama yolu firar kenarı dış kaplama kenarıyla örtüştürülmüştür. Bu işlem inceleme 'b' alanında bulunan diğer arka ara sparlara da uygulanmıştır.



Şekil 5.18. İnceleme ‘B’ alanı tarama yolları [56]

Şekil 5.3’te gösterilen inceleme ‘c’ alanında bulunan arka sparın ilerisindeki ön bağlantı elemanı sırası tespit edilip ilk ve son bağlantı elemanı belirlenmiştir. Bağlantı elemanı sırasının ilk bağlantı elemanı baş kısmının ön kenarından 20 mm ölçülüp konumu onaylı bir işaretleyici ile işaretlenmiştir. Metalik olmayan bir cetvel ve onaylı bir işaretleyici kullanılarak işaretli konumlar arasına çizgiler çizilmiştir. Son tarama yolu, arka spar üzerindeki bağlantı elemanlarının arka sırasından en az 20 mm geride olana kadar, işaretli çizginin arkasında 40 mm tarama yolu aralıkları ölçülmüştür. Onaylanmış bir işaretleyici kullanarak kalan tarama yolları işaretlenmiştir. Bu işlem inceleme ‘c’ alanında bulunan tüm riblere uygulanmıştır.



Şekil 5.19. İnceleme ‘C’ alanı tarama yolları [56]

5.3.1.2. Cihaz Ayarı

RollerFORM prob ve sinyal kodlayıcı konektör, OmniScan MX taşınabilir NDI ölçüm cihazına takılmıştır. Prob tekeri temas maddesi ile kaplanmıştır. Prob tekeri ile temas maddesi arasındaki bağlantıda hava kabarcığı bulunup bulunmadığı kontrol edilmiştir. Prob tekerleği üzerindeki ayar somunu, dişin ucundan yaklaşık 3 mm uzakta oluncaya kadar sıkılmıştır. Cihaz, üretici talimatlarına ve Tablo 5.4.'e göre kalibre edilmiştir.

Tablo 5.4. OmniScan MX faz dizi modülü ilk kurulum ayarları.

Parametre	**Girdi Değeri**
Ölçüm Birimi	Milimetre
Ekran Seçimi	A-C-(C)
C-Tarama 1 Ekran Seçimi	A %
C-Tarama 2 Ekran Seçimi	Kalınlık
Ekran Seçimi	Genlik
Ekran Genlik Başlangıcı (%)	0
Ekran Genlik Bitişi (%)	100
Ekran Seçimi	Derinlik
Ölçüm Okuma Alan 1	A %
Ölçüm Okuma Alan 2	T (A^ - I^)
Prob/Parça Seçimi	Alıcı-Verici
Prob/Parça Otomatik Tespit	Kapalı
Parça Geometrisi	Plaka
Parça Kalınlığı	20 mm

Parça Malzemesi	Alüminyum
Dalga Tipi	Boyuna Dalga
Sinyal Kazancı (dB)	15
Ölçüm Hızı (m/s)	6300
Alıcı/Verici Modu	PE (Darbe-Yankı)

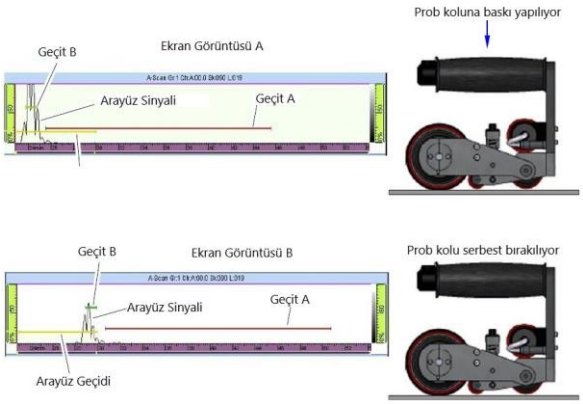
Cihaz, Tablo 5.5'de verilen girdi değerlerine göre ayarlanmıştır.

Tablo 5.5. Sinyal Kodlayıcı Ayarları.

Parametre	**Girdi Değeri**
Sinyal Kodlayıcı Tipi	Dörtgen
Tarama Tipi	Tek-Satır Tarama
Maksimum Tarama Hızı (mm/s)	84
Taranan Alan Başlangıcı (mm)	0
Taranan Alan Bitişi (mm)	200
Tarama Çözünürlüğü (mm)	0.80 (yaklaşık)

Sinyal kodlayıcı kalibrasyonunda 0 mm'lik bir başlangıç konumu 'başlangıç noktası' olarak seçilir. 50 mm'lik bir değer girilerek prob tekerleği tarama yönünde 50 mm döndürülür ve 'kalibre et' seçilir. Daha sonra prob tekerleği başlangıç konumuna kadar döndürülür.

Arayüz geçidi konumu ayarlanırken prob düz bir yüzeye koyulur. A-tarama aralığı 31,5 mm (veya yaklaşık) olarak ayarlanır. Yay direnci karşılanana ve prob tekerleği düz yüzeyle temas edene kadar prob tekerleğine elle baskı uygulanmıştır. A-tarama arayüzü sinyali başlangıç konumunu Şekil 5.20'de bulunan ekran görüntüsü A'ya göre ayarlanmıştır. Arayüz geçidi başlangıç konumu Şekil 5.20'de bulunan ekran görüntüsü A'ya göre ayarlayıp 'I' imleci geçidi oluşturulmuştur. Prob kolu serbest bırakılmıştır. Şekil 5.20 ekran görüntüsü B'ye uygun olarak arayüz geçidi genişliği bu sinyali kapsayacak şekilde ayarlanmıştır. Arayüz geçidi eşiği %20 tam ekran yüksekliğine göre ayarlanmıştır.



Şekil 5.20. Ekran görüntüsü geçit konumları [56]

Daha sonra ise Şekil 5.16 (a)'da bulunan referans bloğu kullanılarak OmniScan MX taşınabilir NDI ölçüm cihazında kalınlık ölçümü yapılmıştır. Referans bloğuna temas maddesi sürülmüştür. RollerFORM faz dizi tekerlekli probu kullanılarak kalınlık ölçümleri tamamlanmıştır. Okunan sinyal değerleri aşağıdaki Şekil 5.21'de gösterilmiştir.



Şekil 5.21. OmniScan MX taşınabilir NDI ölçüm cihazında alınan sinyal değeri

5.3.1.3. İnceleme

Kalibrasyon kurulum dosyası açılıp muayene alanı tanımlanmıştır. Denetim alanının tarama yolu mesafesi ölçülüp tarama yolu uzunluğu + 50 mm girilmiştir. Metalik olmayan düz kenar, tarama yolları için prob tekerleği kılavuzu olarak kanat kaplamasının üzerine

yerleştirilmiştir. Bağlantıyı kolaylaştırmak için inceleme alanına su püskürtülmüştür. Prob tekerleği taramanın başlangıç konumuna yerleştirilmiş ve prob tekerleği indeksinin işaretli tarama yolu ile aynı hizada olduğundan emin olunmuştur. Yay direnci karşılanıncaya kadar prob tekerleğine elle baskı uygulanmıştır ve kazanç, %80 tam ekran yüksekliğine gelecek şekilde ayarlanmıştır. Tarama başlatılıp metalik olmayan düz kenarı kılavuz olarak kullanarak prob tekerleği işaretli tarama yolu boyunca döndürülmüştür. Prob tekerleği indeksinin tarama yolunu takip ettiğinden emin olunmuştur. Tarama yolu tamamlanıp ekran görüntüsü duraklatılmıştır. Kalınlık okumaları doğrudan A-tarama ekranı görüntüsünden alınmamıştır. Ekranın üst kısmında yer alan T(A^ - I^) etiketli alandaki numaradan okuma yapılmıştır. USB fareyi kullanılarak, taramanın tamamı boyunca eşit aralıklı on rastgele alanda C-tarama (A^ - I^, kalınlık tarama) ekranına çift tıklanılmıştır. Elde edilen kalınlık değerlerini okunup elde edilen maksimum kalınlık değeri girilmiştir.

Üreticinin talimatlarına ve SRM 57-21-11PB001'e uygun olarak yakınlaştırma işlevini kullanarak C-taraması A% (genlik taraması) ve C-taraması (A^ - I^, kalınlık tarama) ekranları analiz edilmiştir. Tam ekran yüksekliği (≥ %30) ve buna karşılık gelen malzeme kalınlığının ≥ %10'luk kalınlık değişikliği korozyon olarak tanımlanacaktır. Tüm tarama yolları ve incelenecek tüm alanlar için adımlar tekrarlanmıştır. İnceleme yüzeyinde bulunan temas maddesi silinerek inceleme sona ermiştir.

5.3.2. Kanat 3 ve 4 Numaralı Spoiler Merkez Menteşe Bağlantı Elemanı Yatak Bloğu Muayenesi

Bu muayene yöntemi için NTM 51-40-00, NTM 51-10-07, NTM 51-41-01 ve NTM 51-42-01 referans alınmıştır. Şekil 5.4'te gösterilen inceleme alanlarına, geleneksel ultrasonik muayene yöntemi uygulanarak bölgelerin yorulma hasarı incelemesi yapılmıştır. Bu muayene sırasında; referans blok, EPOCH 650 taşınabilir NDI ölçüm cihazı, SC2822 ultrasonik dönüştürücü, W201 LUCITE takoz ve ZG-F ultrasonik temas maddesi kullanılmıştır.

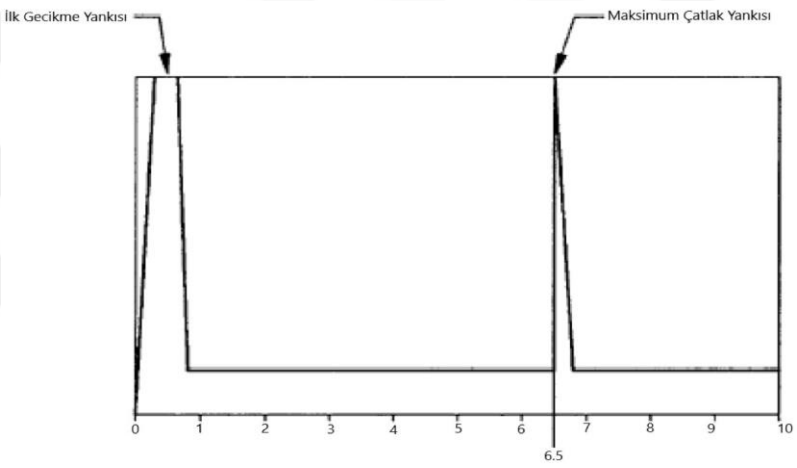
5.3.2.1. İnceleme Hazırlığı

Kanat 3 ve 4 sol ve sağ spoilerin yukarı doğru konumlandırıldığı kontrol edilmiştir. Sol ve sağ kanat hız frenlerinin aşağı doğru konumlandırıldığı kontrol edilmiştir. Muayene

alanının yüzeyinin temiz ve pürüzsüz olup olmadığı kontrol edilmiştir. Muayene alanı gözle görülür herhangi bir hasar veya süreksizliğe karşı kontrol edilmiştir.

5.3.2.2. Cihaz Kalibrasyonu

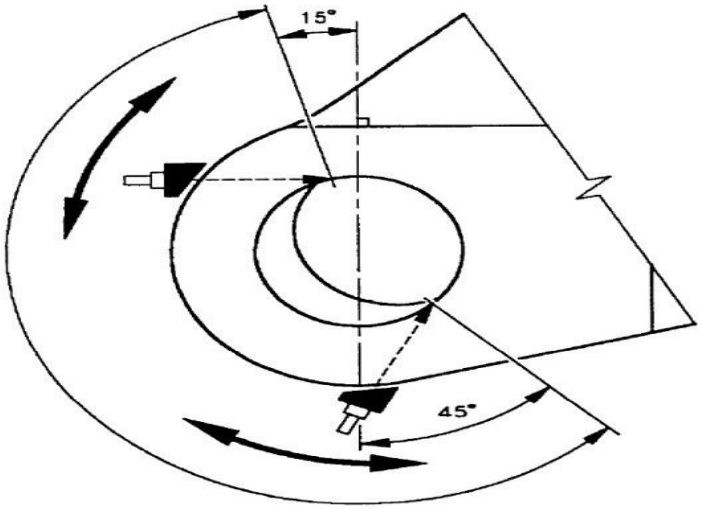
Test ünitesi; alüminyumda 50 mm aralıklı enine dalgaya, ekranda 10 bölüm olacak biçimde ayarlanmıştır. Arama ünitesi referans bloğuna yerleştirilmiştir. Aralık kazancı kontrollerini kullanarak sinyal konumu Şekil 5.22'de gösterildiği gibi yeniden ayarlanmıştır. Tam ekran yükseklik sinyali verecek biçimde cihazın kazanç kontrolü ayarlanmıştır.



Şekil 5.22. Referans blok üzerinde ekipmanın ayarlanması [57]

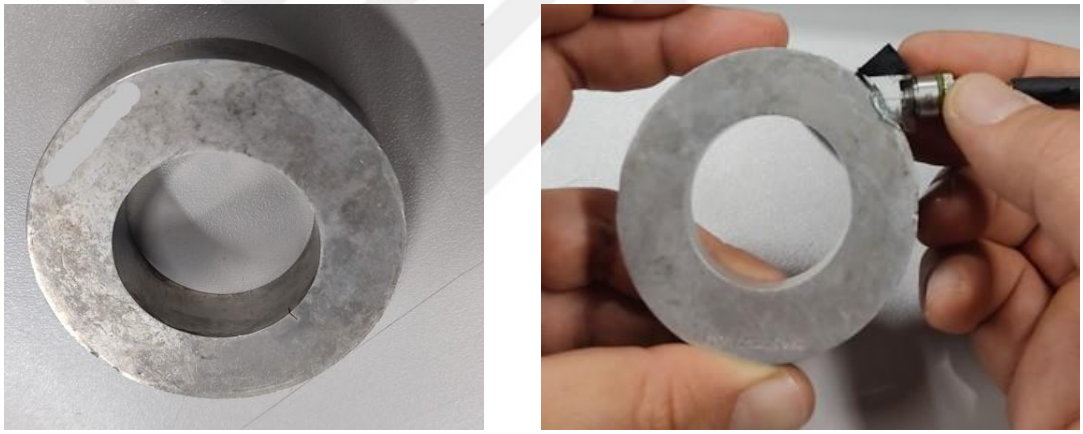
5.3.2.3. İnceleme Prosedürü

Cihaz yukarıdaki bölüme göre uygun olarak kalibre edilmiştir. Arama ünitesi Şekil 5.23'de gösterilene benzer bir pozisyonda yüzeye bağlanmıştır. Alan her iki yönde taranmıştır ve arama ünitesi hafifçe sol ve sağ tarafa çevrilmiştir. Yatak bloğunun her iki tarafı için de aynı işlem tekrarlanmıştır. Tüm göstergeler tam ekran yüksekliğinin ≥ %30'u kadar kaydedilmiştir. Tespit edilen tüm çatlakların uzunluğu uygun olarak ölçülmüştür. CRT ekranının zaman bazında görünen ≥ %30 tam ekran yüksekliği göstergelerinin tümü çatlak olarak kaydedilmiştir. İnceleme yüzeyinde bulunan temas maddesi silinerek inceleme sona ermiştir.



Şekil 5.23. İnceleme alanında prob hareketi [57]

a) b)



Şekil 5.24. Spoiler merkez menteşe bağlantı elemanı yatak bloğu; (a) yatak bloğu, (b) yatak bloğunun prob tertibatıyla incelenmesi

5.3.3. Ana İniş Takımının Rib5 İleri Bağlantı Kulakçığı Muayenesi

Bu muayene yöntemi için NTM 51-40-01 referans alınmıştır. Şekil 5.5'te gösterilen inceleme alanına, faz dizi ultrasonik muayene yöntemi uygulanarak bölgelerin yorulma hasarı incelemesi yapılmıştır. Bu muayene sırasında; referans blok, faz dizi modülü takılı OmniScan MX taşınabilir NDI ölçüm cihazı, EPOCH 650 taşınabilir NDI ölçüm cihazı, SA455T ultrasonik dönüştürücü, 10L32-A1 ultrasonik dönüştürücü, MWUX1214A takozu ve ZG-F ultrasonik temas maddesi kullanılmıştır.

5.3.3.1. İnceleme Hazırlığı

Muayene alanının temiz olduğu ve sızdırmazlık maddesi ve pul pul dökülen boyadan arınmış olduğu kontrol edilmiştir. Muayene alanında gözle görülmeyen hasar veya süreksizlik olmadığı kontrol edilmiştir. Tarama işaretleyici kılavuzu ve onaylı işaretleyiciyi kullanarak dış kaplama bölgesinin üst ve alt sınırlarının kulakçık (lug) üzerinde doğru şekilde işaretlendiğinden emin olunmuştur. Takoz ile arama ünitesi arasında hava kabarcığı olmadığından emin olunmuştur.

5.3.3.2. Cihaz Kalibrasyonu

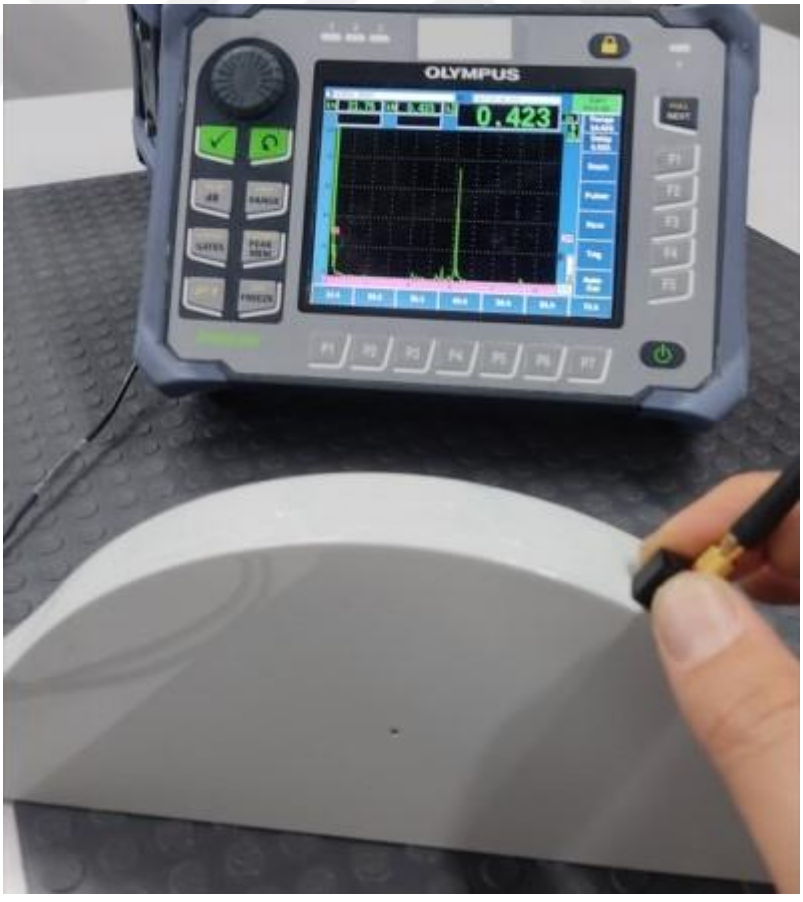
Ekipmanlar üreticinin talimatlarına uygun olarak çalıştırılmıştır. İç kulakçık için 'A' ve 'B' taramasına ilişkin veri ayarları yapılmıştır. Takoz veri parametreleri cihazlara yüklenmiştir. Cihaz kontrollerini ayarlamak için Tablo 5.6.'da bulunan veriler girilmiştir. Girilen verilerin doğru olduğu kontrol edilmiştir. Veri dosyası cihazın flaş kartına kaydedilmiştir.

Tablo 5.6. Cihaz Kontrol Ayarları.

Parametre	**Girdi Değeri**
Prob/Parça Grup Modu	PA
Parça Kalınlığı (mm)	60
Parça Malzemesi	Alüminyum
Eleman Sayısı	16
Dalga Tipi	Boyuna Dalga
Minimum Işın Açısı (Derece)	10
Maksimum Işın Açısı (Derece)	40
Ölçüm Hızı (m/s)	6300
Kazanç	32 dB
Alıcı/Verici Modu	PE (Darbe-Yankı)
Ekran Seçimi	A - S - (C)
Ekran Seçimi	Genlik
Parça Geometrisi	Plaka
Genlik Başlangıcı %	0%
Genlik Bitişi %	100%

Tarama Ekranı	A Tarama
Eşik Değeri %	30%
Okuma Alanı 1	A%
Okuma Alanı 2	SA^

Referans bloğun ‘A’ tarama tarafına temas maddesi sürülmüştür. SA-455T ultrasonik dönüştürücü ile referans bloğun üzerinde arama yapılmıştır. SA-455T ultrasonik dönüştürücüden referans bloğun ortasında bulunan deliğe doğru ultrasonik sinyaller gönderilmiştir. Referans blokta bulunan delikten dönüştürücüye gelen sinyal değeri sonucunda bu deliğin Şekil 5.25’te bulunan dönüştürücü konumuna göre 0.423 inç yani 1.074420 cm mesafede bulunduğu tespit edilmiştir. Bu inceleme için EPOCH 650 taşınabilir NDI ölçüm cihazı kullanılmıştır. Yapılan inceleme sonrası ekrandan alınan sinyal değerleri Şekil 5.25’te verilmiştir.

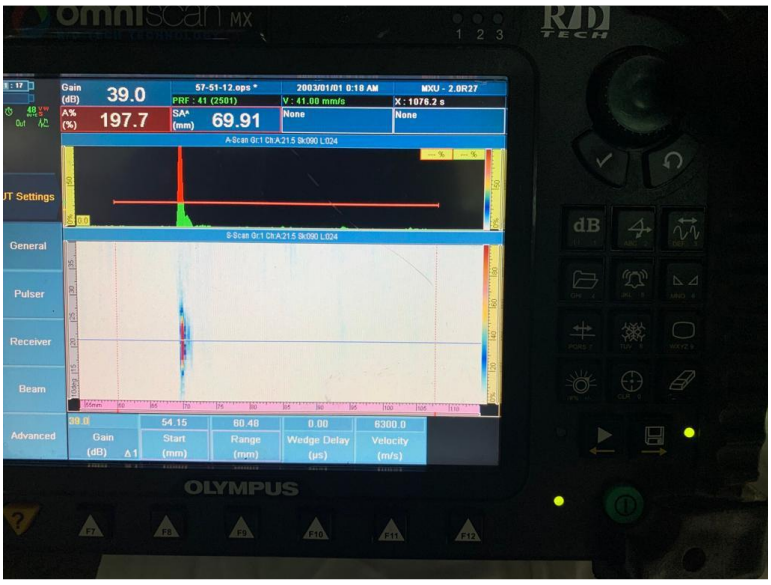


Şekil 5.25. EPOCH 650 cihazı ekranında okunan sinyal değeri

Daha sonra ise cihaz kalibrasyonu işlemi için OmniScan MX taşınabilir NDI ölçüm cihazı kullanılmıştır. Referans bloğa temas maddesi sürülmüştür. Daha sonra ise 10L32-A1 ultrasonik dönüştürücü referans bloğuna bağlanmıştır. Referans bloğunda bulunan yandan açılmış delikten gelen sinyal, zaman bazında yaklaşık 70 mm'de tanımlanmıştır. Yandan açılan delikten gelen sinyal %100 tam ekran yüksekliği sağlayacak şekilde maksimuma çıkarılmıştır ve 6 dB eklenmiştir. Bu sinyal değerleri Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'de gösterilmiştir.



Şekil 5.26. OmniScan MX cihaz kalibrasyonu



Şekil 5.27. +6 dB OmniScan MX cihaz kalibrasyonu

5.3.3.3. İnceleme Prosedürü

OmniScan MX faz dizi ultrasonik muayene cihazı Tablo 5.6.'ya göre kalibre edilmiştir. Kulakçık inceleme alanının yüzeyine temas maddesi sürülmüştür. Şekil 5.28'de gösterilen konumdaki kulakçığa ultrasonik prob yerleştirilmiştir. Kulakçığı incelemek için düz geçişli taramalar ve döner taramalar yapılmıştır. 'A' tarama için inceleme alanlarını taraması tamamlanmıştır. 'A' tarama ekranında ≥ %30 tam ekran yüksekliğindeki sinyaller çatlak olarak kaydedilir. Çatlaklar 'S' tarama ekranında kırmızı ve sarı merkezli koyu mavi göstergeler olarak gösterilir. Göstergenin orta alanı, maksimum genliği ve optimize edilmiş ses ışını açısını tanımlar. Işın imleci, ≥ %30 tam ekran yüksekliği olan geçit alanı içindeki en güçlü sinyali otomatik olarak tanımlamış ve ayrıca 'A' tarama ekranında göstermiştir. İnceleme yüzeyinden tüm temas maddesi temizlenerek muayene sona ermiştir.



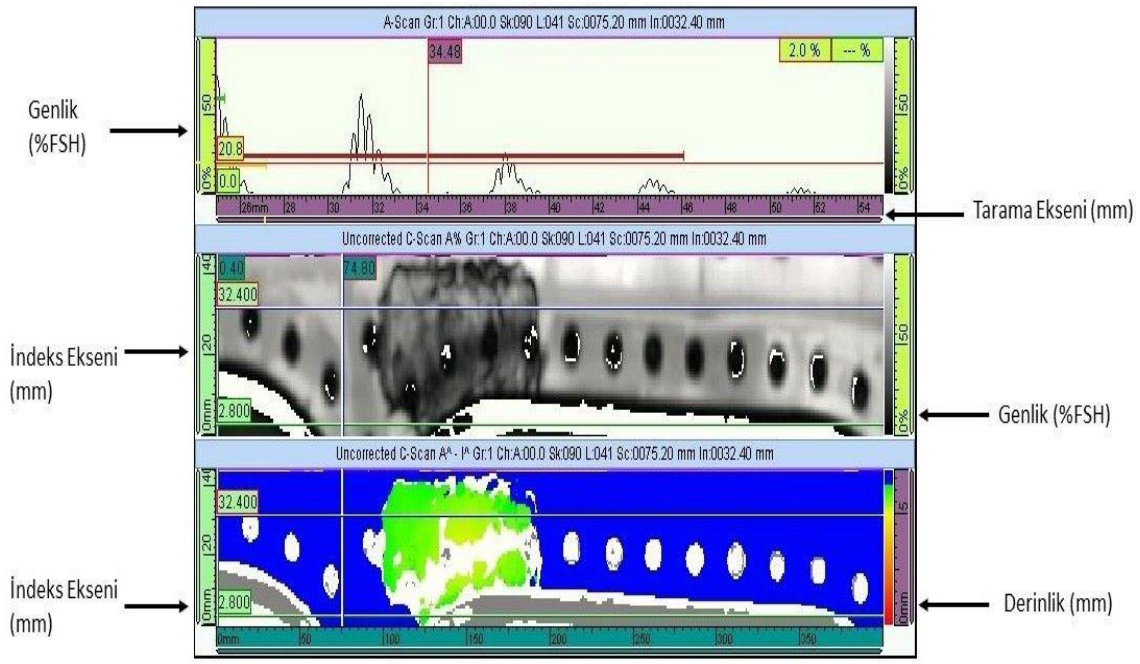
Şekil 5.28. İncelenen alan

6. BÖLÜM

BULGULAR

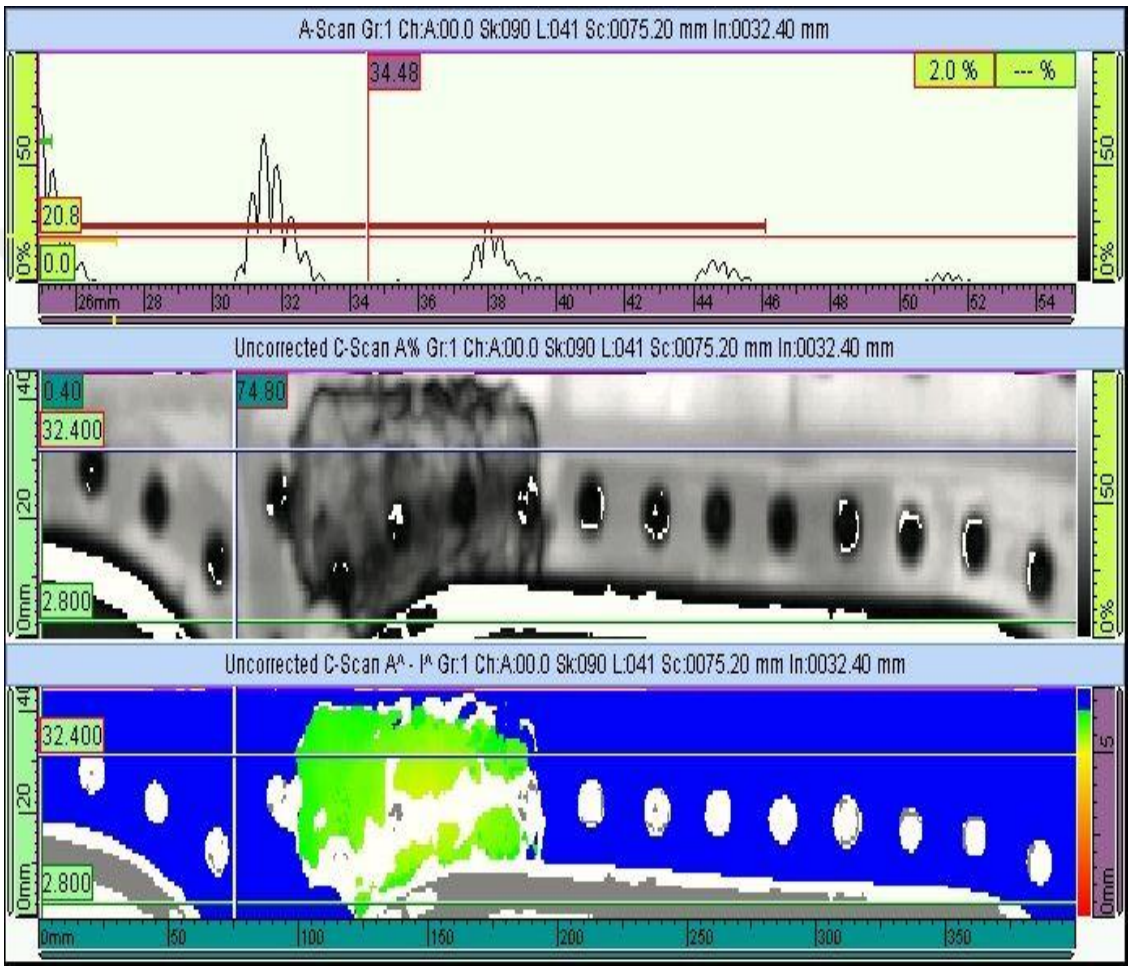
6.1. Firar Kenarı ile Arka Spar ve Arka Ara Spar Ön Bağlantı Sırası Arasındaki Üst Kanat Dış Kaplamasının Muayene Görüntüleri

Bu muayene için gerekli ön hazırlıklar, cihaz kalibrasyonları ve ardından incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bu muayeneler sırasında OmniScan MX taşınabilir NDI ölçüm cihazı kullanılmıştır. Aşağıda bulunan Şekil 6.2'den Şekil 6.9'e kadar olan şekillerde muayene sonucunda elde edilen inceleme sonuçları gösterilmektedir. Bu inceleme sonuçları faz dizi ultrasonik cihazından elde edilen görüntülerdir. Bu muayene görüntülerinde bulunan 'I' imlecinde olan geçit değerinin üzerinde olan genlik değeri (tam ekran yüksekliği) korozyon olarak değerlendirilmiştir. Airbus, kanat üst yüzeyinin dış kaplamasında ve/veya arka spar cıvataları çevresinde başlayan ve malzeme kalınlığının ≥ %10'u kadar alt yüzeye nüfuz eden korozyon bulunabileceğini belirtiyor.



Şekil 6.1. Ultrasonik tarama görünümlerinin eksenleri

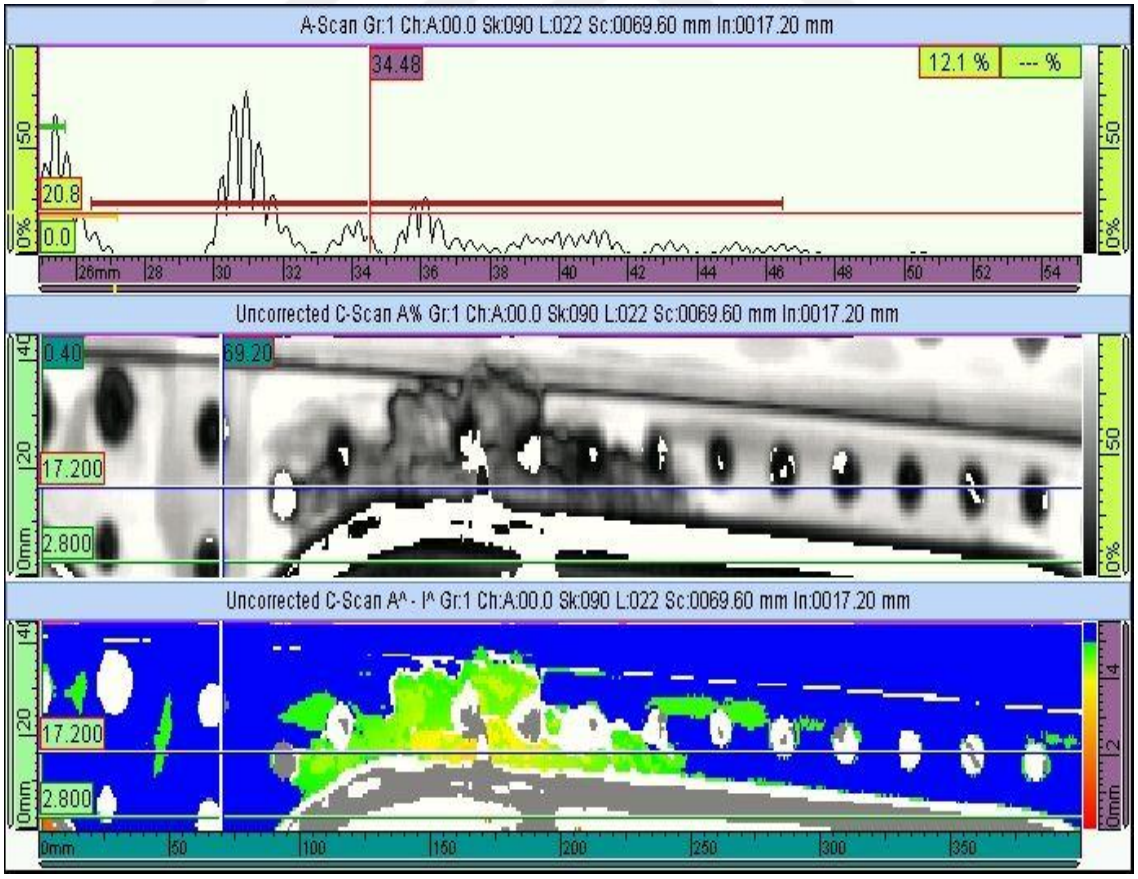
Yukarıda bulunan Şekil 6.1'de A-tarama eksenleri, yatay eksende tarama ekseni ve dikey eksende ise genlik değeridir. Aşağıda bulunan şekillerdeki genlik C-tarama eksenleri; yatay eksende tarama ekseni, dikey eksende indeks ekseni ve z ekseninde ise genlik değeridir. Aşağıda bulunan şekillerdeki derinlik C-tarama eksenleri; yatay eksende tarama ekseni, dikey eksende indeks ekseni ve z ekseninde ise derinlik değeridir.



Şekil 6.2. '1' numaralı ultrasonik muayene görünümlerinin yerleşimi

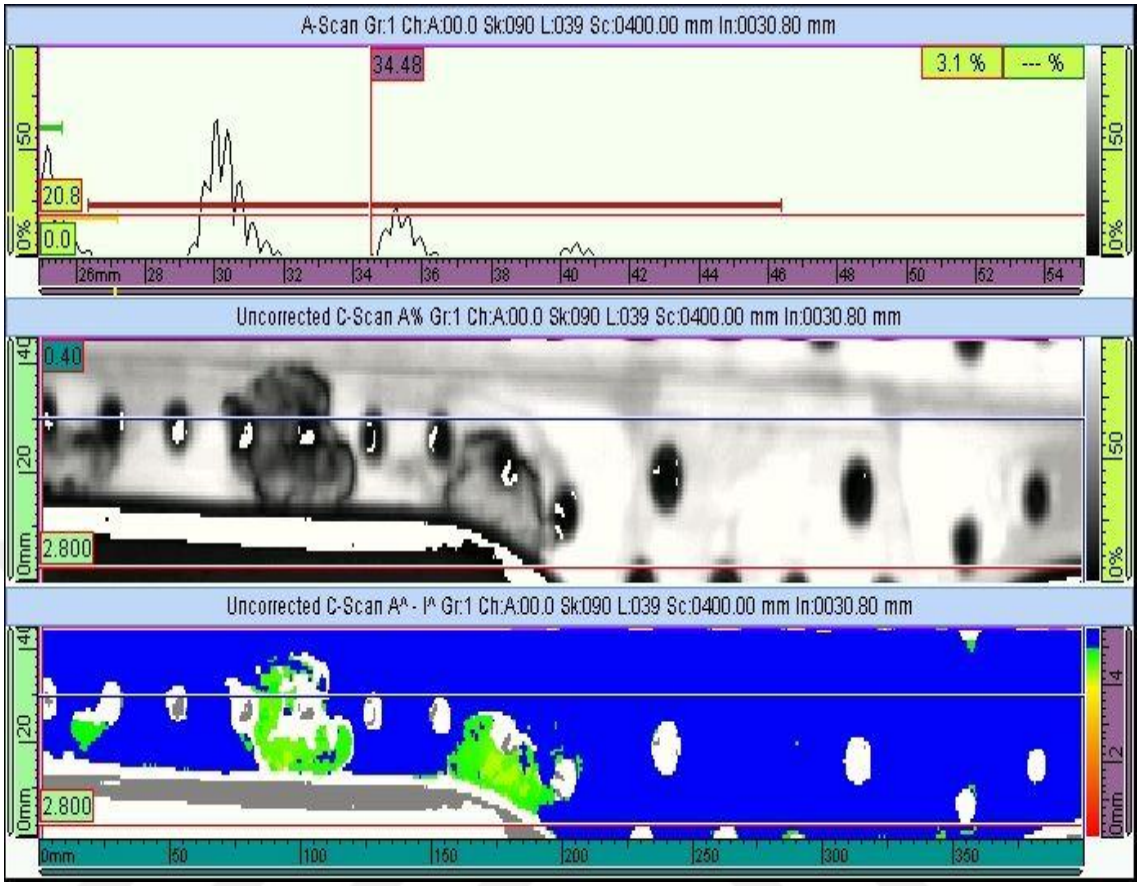
Şekil 6.2'de bulunan ultrasonik görünümdeki a-tarama bölümünde %20,8 tam ekran yüksekliğinde arayüz geçidi bulunmaktadır. A-tarama bölümünde %25 tam ekran yüksekliğinde 'A' geçidi bulunmaktadır. Bu geçit değerinin yukarısında bulunan sinyal ekoları malzemedeki korozyon olarak değerlendirilir. Tarama ekseninde 25 mm ve 25.5 mm, 31 mm ve 32.4 mm arasında genlik değerleri ölçülmüştür. Genlik c-tarama bölümünde ise indeks ekseninin 2.80 mm ve 32.40 mm değerlerine bir geçit çizilmiştir. Tarama ekseninde ise 74.80 mm seviyesinde bir geçit çizilmiştir. Bu değerler arasında kalan bölge, incelenen malzeme yüzeyinde oluşan korozyonun büyük bir kısmını

içermektedir. Genlik c-tarama bölümünde çizilen geçitler derinlik c-tarama bölümünde de çizilmiştir. Çünkü derinlik c-tarama görüntüsü, genlik c-tarama görüntüsünün renklendirilmiş bir görünümüdür. Oluşan korozyon tarama ekseninde 100 mm ve 190 mm arasında oluşmuştur. İndeks ekseninde ise başlangıç kısmından (0 mm) 44 mm arasında korozyon oluşumu gerçekleşmiştir. Genlik c-tarama bölümünde z ekseninde bulunan genlik (%FSH) sütununda başlangıçtan %0'dan %100 kısmına kadar sinyal alınmıştır. Şekil 6.2'de derinlik c-tarama bölümünde z ekseninde bulunan derinlik sütununda malzeme kalınlığı için yapılan renklendirme görülmektedir. Bu renklendirme sistemi malzeme kalınlığı azaldıkça maviden kırmızıya doğru gitmektedir. 5 mm derinlik ve daha fazla kalınlık değeri mavi renkle gösterilmektedir. 4 ve 5 mm arası yeşil renk tonlarında gösterilmektedir. Bu iki renk arasındaki fark malzeme kalınlığının %10'dan fazla azaldığına denk gelmektedir. Bu kalınlık kaybı da Airbus tarafından bildirilen ≥ %10 malzeme kalınlığı azalması değerine uymaktadır. İncelenen bu yüzeyde yeşil renkli bölgelerde korozyon tespit edilmiştir.



Şekil 6.3. '2' numaralı ultrasonik muayene görünümlerinin yerleşimi

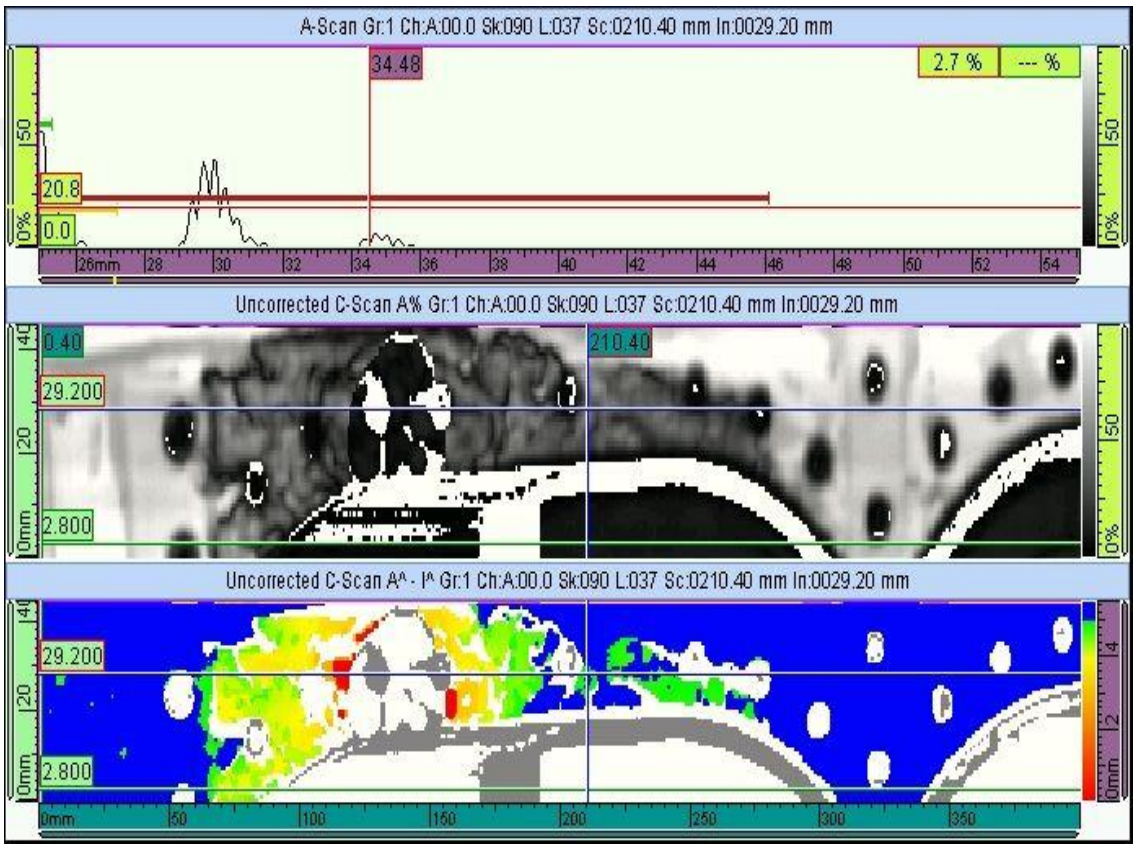
Şekil 6.3'te bulunan ultrasonik görünümdeki a-tarama bölümünde %20,8 tam ekran yüksekliğinde arayüz geçidi bulunmaktadır. A-tarama bölümünde %25 tam ekran yüksekliğinde 'A' geçidi bulunmaktadır. Bu geçit değerinin yukarısında bulunan sinyal ekoları malzemedeki korozyon olarak değerlendirilir. Tarama ekseninde 25 mm ve 25.8 mm, 30 mm ve 31.8 mm arasında genlik değerleri ölçülmüştür. Genlik c-tarama bölümünde ise indeks ekseninin 2.80 mm ve 17.20 mm değerlerine bir geçit çizilmiştir. Tarama ekseninde ise 69.20 mm seviyesinde bir geçit çizilmiştir. Genlik c-tarama bölümünde çizilen geçitler derinlik c-tarama bölümünde de çizilmiştir. Oluşan korozyon tarama ekseninde çoğunlukla 90 mm ve 250 mm arasında oluşmuştur. İndeks ekseninde ise çoğunlukla 5 mm ve 36 mm arasında korozyon oluşumu gerçekleşmiştir. Bu eksenlerde yukarıda verilen mesafeler dışında da küçük korozyon alanları oluşumu gözlemlenmektedir. Genlik c-tarama bölümünde z ekseninde bulunan genlik (%FSH) sütununda çoğunlukla %15'den %85 kısmına kadar sinyal alınmıştır. Derinlik c-tarama bölümünde z ekseninde bulunan derinlik sütununda gösterilen renklendirmeler incelendiğinde ise çoğunlukla mavi renkler hakimdir. Korozyonun yoğun olduğu orta kısımda ise yeşil, sarı ve turuncu renkler hakimdir. Bu renk değişimi de malzeme kalınlığının çoğunlukla 4 mm ve 5 mm arasında olduğunu göstermektedir. Bu değer ise %10 ile %20 arasında oluşan korozyonu göstermektedir. İndeks ekseni ve tarama ekseninin birleşim yerinde oluşan korozyon turuncu tonlarında bir renktedir. Turuncu tonlarında bulunan renkli bölgelerde malzeme kalınlığı 2 mm ve 3 mm arasındadır. Turuncu tonlarındaki değerler incelendiğinde malzeme kalınlığının %40 ile %60 seviyelerinde kayba uğradığını görülmektedir. Oluşan korozyon sebebiyle kanat dış kaplama malzeme kalınlığında %10 ile %60 seviyelerinde azalma olduğu görülmektedir. Bu değerler de Airbus tarafından bildirilen ≥ %10 malzeme kalınlığı azalması değerinden daha fazla olduğu için korozyon olarak nitelendirilmektedir.



Şekil 6.4. '3' numaralı ultrasonik muayene görünümlerinin yerleşimi

Şekil 6.4'te bulunan ultrasonik görünümdeki a-tarama bölümünde %20,8 tam ekran yüksekliğinde arayüz geçidi bulunmaktadır. A-tarama bölümünde %25 tam ekran yüksekliğinde 'A' geçidi bulunmaktadır. Bu geçit değerinin yukarısında bulunan sinyal ekoları malzemedeki korozyon olarak değerlendirilir. Tarama ekseninde 25 mm ve 25.4 mm, 29.6 mm ve 30.8 mm arasında genlik değerleri ölçülmüştür. Genlik c-tarama bölümünde ise indeks ekseninin 2.80 mm ve 30 mm değerlerine bir geçit çizilmiştir. Tarama ekseninde ise bir geçit çizilmemiştir. Genlik c-tarama bölümünde çizilen geçitler derinlik c-tarama bölümünde de çizilmiştir. Oluşan korozyon çoğunlukla çizilen bu geçitler arasında yer almaktadır. Korozyon tarama ekseninde çoğunlukla 75 mm ve 200 mm arasında oluşmuştur. İndeks ekseninde ise çoğunlukla 4 mm ve 38 mm arasında iki büyük korozyon oluşumu gerçekleşmiştir. Bu eksenlerde yukarıda verilen mesafeler dışında da küçük korozyon alanları oluşumu gözlemlenmektedir. Genlik c-tarama bölümünde z ekseninde bulunan genlik (%FSH) sütununda çoğunlukla %20'den %85 kısmına kadar sinyal alınmıştır. Derinlik c-tarama bölümünde z ekseninde bulunan derinlik sütununda gösterilen renklendirmeler incelendiğinde ise çoğunlukla mavi renkler

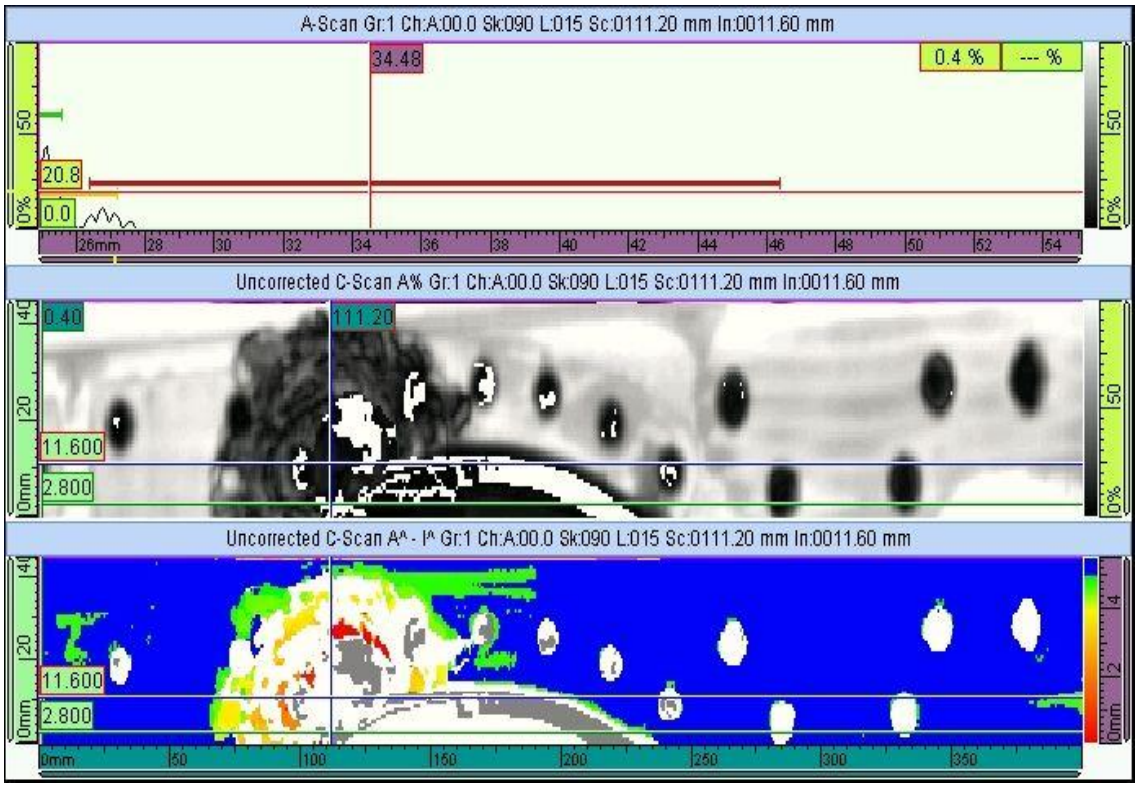
hakimdir. Korozyonun yoğun olduğu iki büyük alanda yeşil ve tonları hakimdir. Bu alanlar dışında bulunan diğer küçük korozyon alanlarında da yeşil renk hakimdir. Bu renk değişimi de malzeme kalınlığının çoğunlukla 4 mm ve 5 mm arasında olduğunu göstermektedir. Bu renk değişimi de malzeme kalınlığının %10 ile %20 seviyelerinde kayba uğradığını göstermektedir. Bu değerler de Airbus tarafından bildirilen ≥ %10 malzeme kalınlığı azalması değerinden daha fazla olduğu için korozyon olarak nitelendirilmektedir.



Şekil 6.5. '4' numaralı ultrasonik muayene görünümlerinin yerleşimi

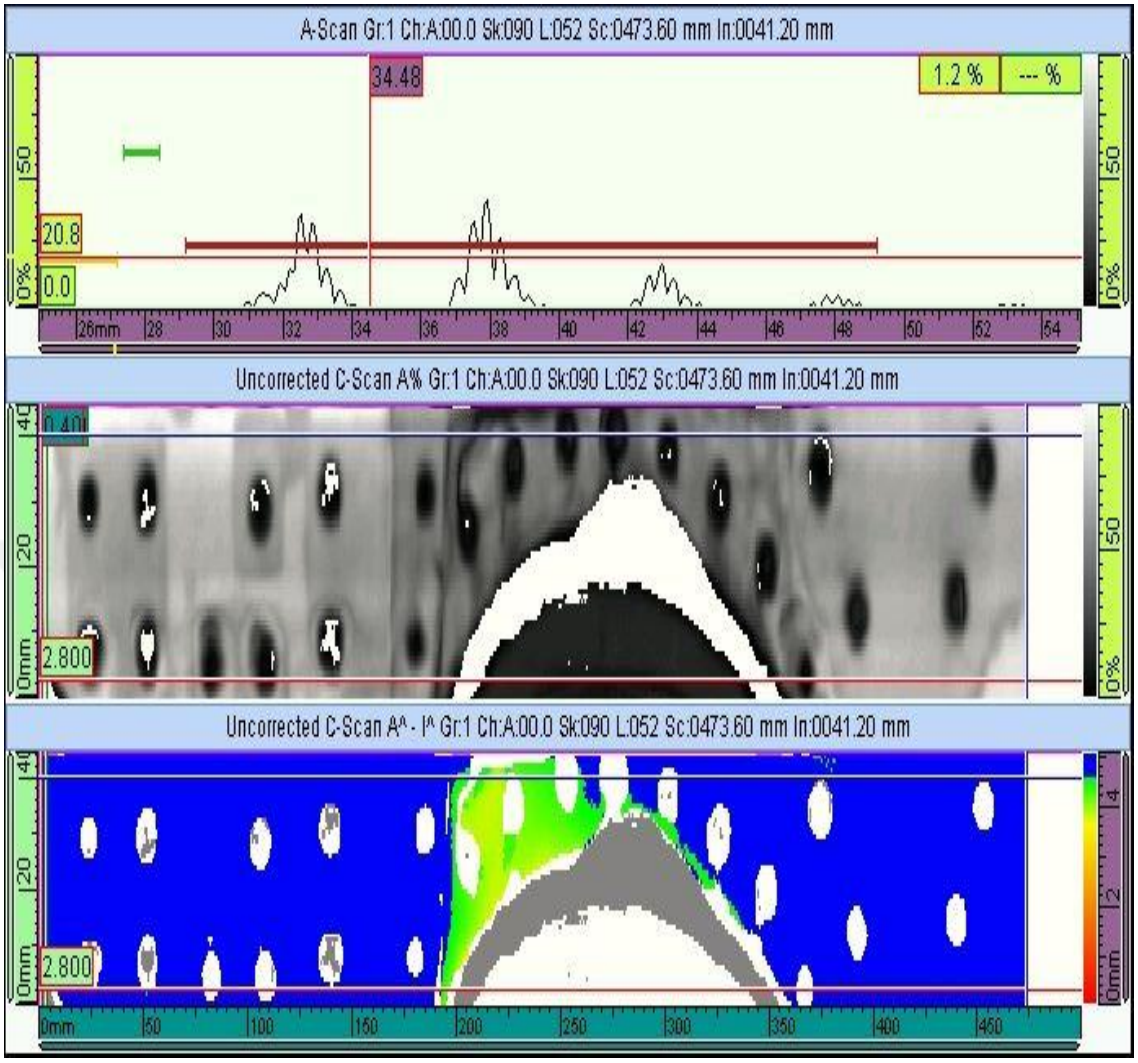
Şekil 6.5'te bulunan ultrasonik görünümdeki a-tarama bölümünde %20,8 tam ekran yüksekliğinde arayüz geçidi bulunmaktadır. A-tarama bölümünde %25 tam ekran yüksekliğinde 'A' geçidi bulunmaktadır. Bu geçit değerinin yukarısında bulunan sinyal ekoları malzemedeki korozyon olarak değerlendirilir. Tarama ekseninde 25 mm ve 25.2 mm, 29.6 mm ve 30.4 mm arasında genlik değerleri ölçülmüştür. Genlik c-tarama bölümünde ise indeks ekseninin 2.80 mm ve 29.20 mm değerlerine bir geçit çizilmiştir. Tarama ekseninde ise 210.40 mm seviyesinde bir geçit çizilmiştir. Genlik c-tarama bölümünde çizilen geçitler derinlik c-tarama bölümünde de çizilmiştir. Oluşan korozyon

çoğunlukla çizilen bu geçitler arasında yer almaktadır. Korozyon tarama ekseninde çoğunlukla 60 mm ve 275 mm arasında oluşmuştur. İndeks ekseninde ise çoğunlukla başlangıçtan (0 mm) ve 44 mm arasında korozyon oluşmuştur. Bu eksenlerde yukarıda verilen mesafeler dışında da küçük korozyon alanları oluşumu gözlemlenmektedir. Genlik c-tarama bölümünde z ekseninde bulunan genlik (%FSH) sütununda başlangıçtan %0'dan %100 kısmına kadar sinyal alınmıştır. Derinlik c-tarama bölümünde z ekseninde bulunan derinlik sütununda gösterilen renklendirmeler incelendiğinde ise çoğunlukla mavi renkler hakimdir. Korozyonun yoğun olduğu orta kısımda ise yeşil, sarı, turuncu ve kırmızı renkler hakimdir. Bu alanlar dışında bulunan diğer küçük korozyon alanlarında da yeşil renk hakimdir. Bu renk değişimleri de malzeme kalınlığının 0 mm ve 5 mm arasında değişkenlik gösterdiğini göstermektedir. Kırmızı renkli görünen bölgelerde malzeme kalınlığı 0 mm seviyelerine inmiştir. Bu renk değişimi de malzeme kalınlığının %80 ile %100 seviyelerinde kayba uğradığını göstermektedir. Görünen tüm renk değişimleri incelendiğinde malzeme kalınlığının %10 ile %100 seviyeleri arasında bir kayba uğradığı görülmektedir. Bu değerler de Airbus tarafından bildirilen ≥ %10 malzeme kalınlığı azalması değerinden daha fazla olduğu için korozyon olarak nitelendirilmektedir.



Şekil 6.6. '5' numaralı ultrasonik muayene görünümlerinin yerleşimi

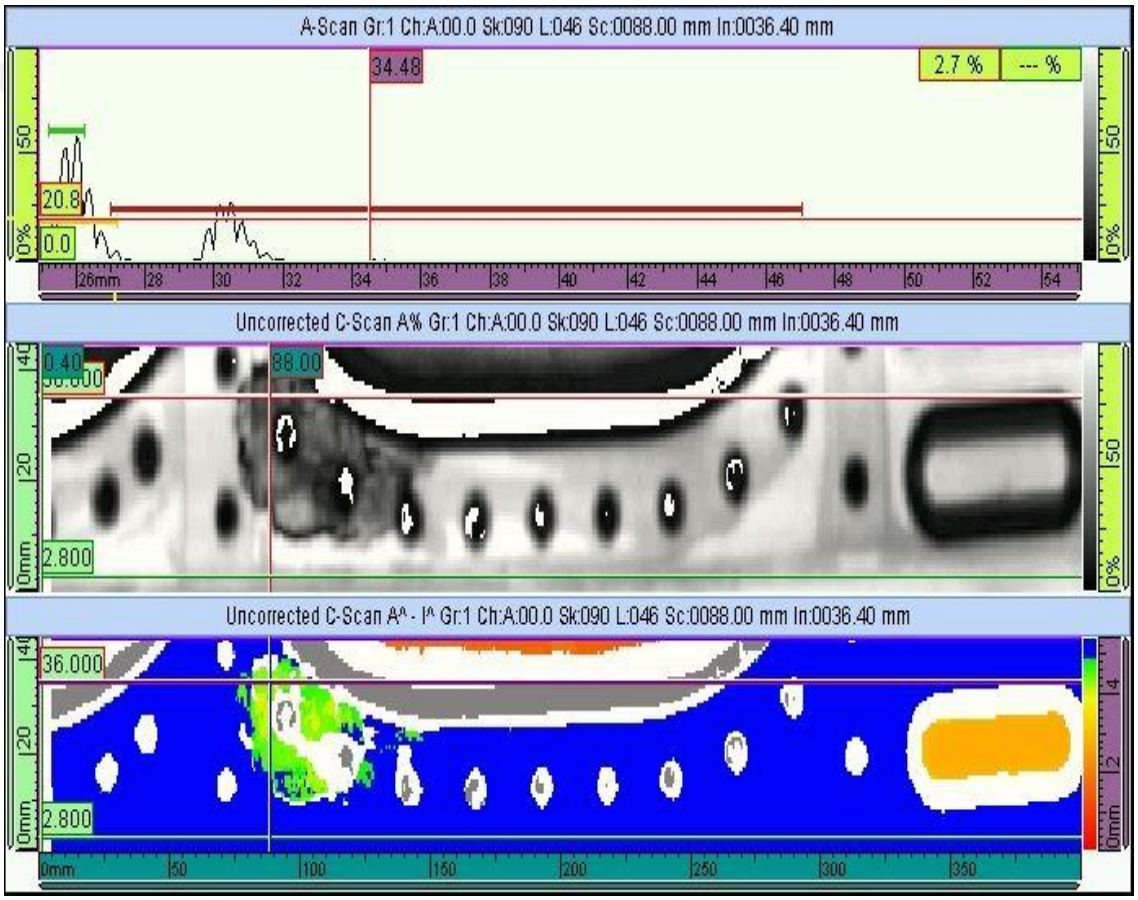
Şekil 6.6'da bulunan ultrasonik görünümdeki a-tarama bölümünde %20,8 tam ekran yüksekliğinde arayüz geçidi bulunmaktadır. A-tarama bölümünde %25 tam ekran yüksekliğinde 'A' geçidi bulunmaktadır. Bu geçit değerinin yukarısında bulunan sinyal ekoları malzemedeki korozyon olarak değerlendirilir. Tarama ekseninde 25 mm ve 25.4 mm arasında genlik değerleri ölçülmüştür. Genlik c-tarama bölümünde ise indeks ekseninin 2.80 mm ve 11.60 mm değerlerine bir geçit çizilmiştir. Tarama ekseninde ise 111.20 mm seviyesinde bir geçit çizilmiştir. Genlik c-tarama bölümünde çizilen geçitler derinlik c-tarama bölümünde de çizilmiştir. Oluşan korozyonun az bir kısmı çizilen bu geçitler arasında yer almaktadır. Korozyon tarama ekseninde çoğunlukla 65 mm ve 190 mm arasında oluşmuştur. İndeks ekseninde ise çoğunlukla başlangıçtan (0 mm) ve 42 mm arasında korozyon oluşmuştur. Bu eksenlerde yukarıda verilen mesafeler dışında da küçük korozyon alanları oluşumu gözlemlenmektedir. Genlik c-tarama bölümünde z ekseninde bulunan genlik (%FSH) sütununda başlangıçtan %0'dan %95 kısmına kadar sinyal alınmıştır. Derinlik c-tarama bölümünde z ekseninde bulunan derinlik sütununda gösterilen renklendirmeler incelendiğinde ise çoğunlukla mavi renkler hakimdir. Korozyonun yoğun olduğu orta kısımda ise yeşil, sarı, turuncu ve kırmızı renkler hakimdir. Bu alanlar dışında bulunan diğer küçük korozyon alanlarında da yeşil renk hakimdir. Bu renk değişimleri de malzeme kalınlığının 0 mm ve 5 mm arasında değişkenlik gösterdiğini göstermektedir. Görünen tüm renk değişimleri incelendiğinde malzeme kalınlığının %10 ile %100 seviyeleri arasında bir kayba uğradığı görülmektedir. Bu değerler de Airbus tarafından bildirilen ≥ %10 malzeme kalınlığı azalması değerinden daha fazla olduğu için korozyon olarak nitelendirilmektedir.



Şekil 6.7. ‘6’ numaralı ultrasonik muayene görünümlerinin yerleşimi

Şekil 6.7’de bulunan ultrasonik görünümdeki a-tarama bölümünde %20,8 tam ekran yüksekliğinde arayüz geçidi bulunmaktadır. A-tarama bölümünde %25 tam ekran yüksekliğinde ‘A’ geçidi bulunmaktadır. Bu geçit değerinin yukarısında bulunan sinyal ekoları malzemedeki korozyon olarak değerlendirilir. Tarama ekseninde 32.4 mm ve 33 mm arasında ve 37.4 mm ve 38.2 mm arasında genlik değerleri ölçülmüştür. Genlik c-tarama bölümünde ise indeks ekseninin 2.80 mm ve 40.40 mm değerlerine bir geçit çizilmiştir. Tarama ekseninde ise bir geçit bulunmamaktadır. Genlik c-tarama bölümünde çizilen geçitler derinlik c-tarama bölümünde de çizilmiştir. Oluşan korozyonun çoğunluğu çizilen bu geçitler arasında yer almaktadır. Korozyon tarama ekseninde çoğunlukla 190 mm ve 340 mm arasında oluşmuştur. İndeks ekseninde ise çoğunlukla başlangıçtan (0 mm) ve 42 mm arasında korozyon oluşmuştur. Genlik c-tarama bölümünde z ekseninde bulunan genlik (%FSH) sütununda başlangıçtan %0’dan %95

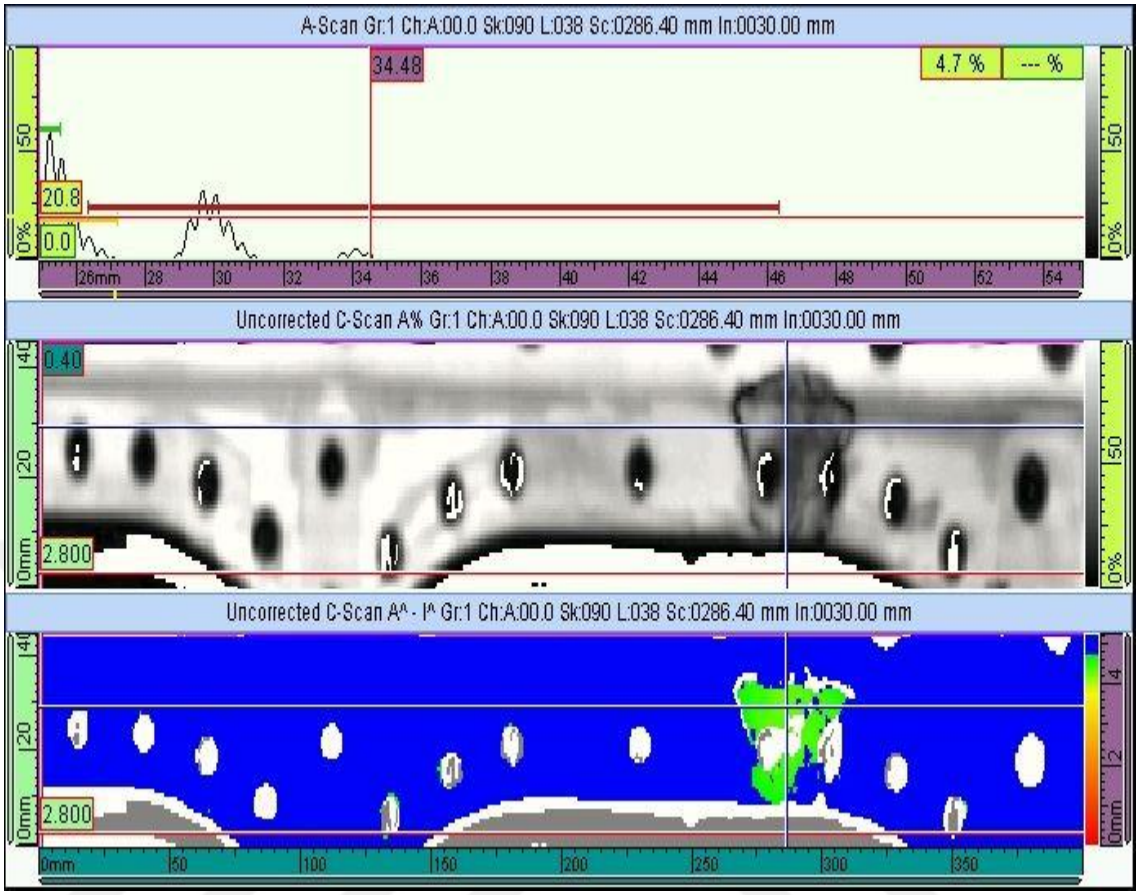
kısmına kadar sinyal alınmıştır. Derinlik c-tarama bölümünde z ekseninde bulunan derinlik sütununda gösterilen renklendirmeler incelendiğinde ise çoğunlukla mavi renkler hakimdir. Korozyonun olduğu orta kısımda ise yeşil ve tonları hakimdir. Bu renk değişimleri de malzeme kalınlığının 4 mm ve 5 mm arasında değişkenlik gösterdiğini göstermektedir. Görünen renk değişimleri incelendiğinde malzeme kalınlığının %10 ile %20 seviyeleri arasında bir kayba uğradığı görülmektedir. Bu değerler de Airbus tarafından bildirilen ≥ %10 malzeme kalınlığı azalması değerinden daha fazla olduğu için korozyon olarak nitelendirilmektedir.



Şekil 6.8. '7' numaralı ultrasonik muayene görünümlerinin yerleşimi

Şekil 6.8'de bulunan ultrasonik görünümdeki a-tarama bölümünde %20,8 tam ekran yüksekliğinde arayüz geçidi bulunmaktadır. A-tarama bölümünde %25 tam ekran yüksekliğinde 'A' geçidi bulunmaktadır. Bu geçit değerinin yukarısında bulunan sinyal ekoları malzemedeki korozyon olarak değerlendirilir. Tarama ekseninde 25.6 mm ve 26.5 mm arasında ve 30.2 mm ve 30.6 mm arasında genlik değerleri ölçülmüştür. Genlik c-tarama bölümünde ise indeks ekseninin 2.80 mm ve 36 mm değerlerine bir geçit

çizilmiştir. Tarama ekseninde ise 88 mm seviyesinde bir geçit çizilmiştir. Genlik c-tarama bölümünde çizilen geçitler derinlik c-tarama bölümünde de çizilmiştir. Oluşan korozyonun çoğunluğu çizilen bu geçitler arasında yer almaktadır. Korozyon tarama ekseninde çoğunlukla 80 mm ve 125 mm arasında oluşmuştur. İndeks ekseninde ise çoğunlukla 10 mm ve 38 mm arasında korozyon oluşmuştur. Bu eksenlerde yukarıda verilen mesafeler dışında da küçük korozyon alanları oluşumu gözlemlenmektedir. Tarama ekseninde 380 mm ve 440 mm arasında, indeks ekseninde ise 14 mm ve 28 mm arasında oluşan dış kaplama cebi (skin pocket) oluşmaktadır. Genlik c-tarama bölümünde z ekseninde bulunan genlik (%FSH) sütununda başlangıçtan %25'den %100 kısmına kadar sinyal alınmıştır. Derinlik c-tarama bölümünde z ekseninde bulunan derinlik sütununda gösterilen renklendirmeler incelendiğinde ise çoğunlukla mavi renkler hakimdir. Korozyonun olduğu orta kısımda ise yeşil ve tonları hakimdir. Bu renk değişimleri de malzeme kalınlığının 4 mm ve 5 mm arasında değişkenlik gösterdiğini göstermektedir. Oluşan dış kaplama cebinde turuncu renkler hakimdir. Bu da malzeme kalınlığında %60 kayıp oluştuğunu göstermektedir. Görünen renk değişimleri incelendiğinde malzeme kalınlığının %10 ile %60 seviyeleri arasında bir kayba uğradığı görülmektedir. Bu değerler de Airbus tarafından bildirilen ≥ %10 malzeme kalınlığı azalması değerinden daha fazla olduğu için korozyon olarak nitelendirilmektedir.



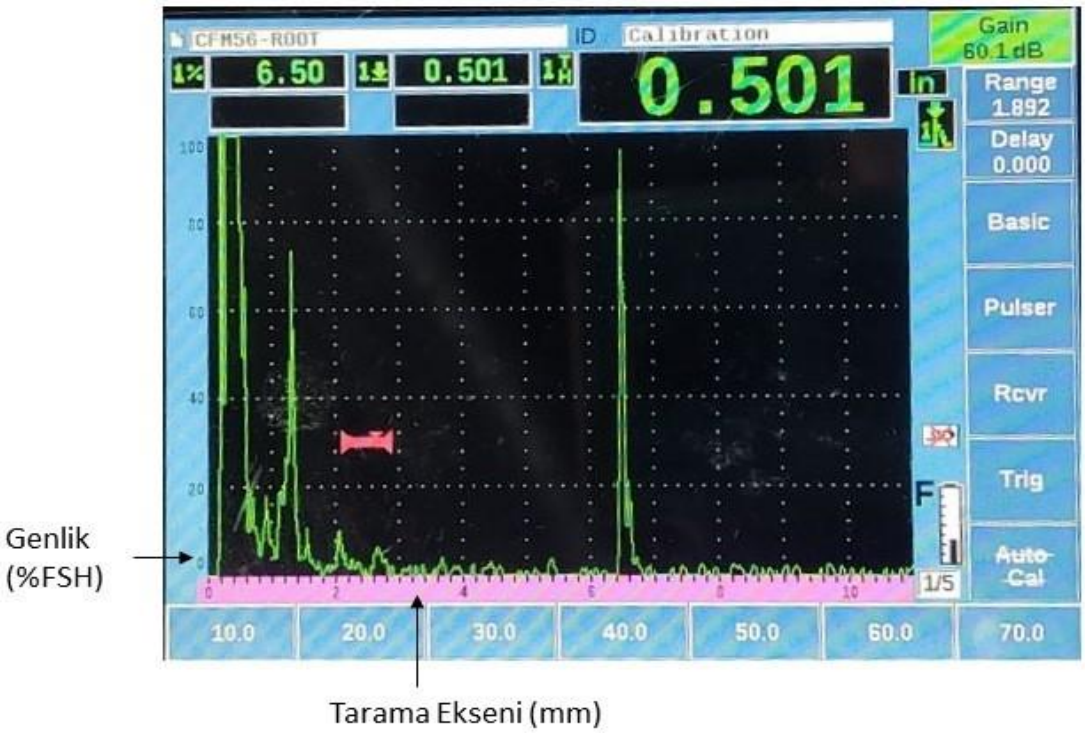
Şekil 6.9. '8' numaralı ultrasonik muayene görünümlerinin yerleşimi

Şekil 6.9'da bulunan ultrasonik görünümdeki a-tarama bölümünde %20,8 tam ekran yüksekliğinde arayüz geçidi bulunmaktadır. A-tarama bölümünde %25 tam ekran yüksekliğinde 'A' geçidi bulunmaktadır. Bu geçit değerinin yukarısında bulunan sinyal ekoları malzemedeki korozyon olarak değerlendirilir. Tarama ekseninde 25.2 mm ve 25.8 mm arasında ve 29.6 mm ve 30.2 mm arasında genlik değerleri ölçülmüştür. Genlik c-tarama bölümünde ise indeks ekseninin 2.80 mm ve 29.60 mm değerlerine bir geçit çizilmiştir. Tarama ekseninde ise 286 mm seviyesinde bir geçit çizilmiştir. Genlik c-tarama bölümünde çizilen geçitler derinlik c-tarama bölümünde de çizilmiştir. Oluşan korozyonun bir kısmı çizilen bu geçitler arasında yer almaktadır. Korozyon tarama ekseninde çoğunlukla 270 mm ve 310 mm arasında oluşmuştur. İndeks ekseninde ise çoğunlukla başlangıçtan 10 mm ve 32 mm arasında korozyon oluşmuştur. Genlik c-tarama bölümünde z ekseninde bulunan genlik (%FSH) sütununda başlangıçtan %15'dan %80 kısmına kadar sinyal alınmıştır. Derinlik c-tarama bölümünde z ekseninde bulunan derinlik sütununda gösterilen renklendirmeler incelendiğinde ise çoğunlukla mavi renkler hakimdir. Korozyonun olduğu kısımda ise yeşil ve tonları hakimdir. Bu renk değişimleri

de malzeme kalınlığının 4 mm ve 5 mm arasında değişkenlik gösterdiğini göstermektedir. Görünen renk değişimleri incelendiğinde malzeme kalınlığının %10 ile %20 seviyeleri arasında bir kayba uğradığı görülmektedir. Bu değerler de Airbus tarafından bildirilen ≥ %10 malzeme kalınlığı azalması değerinden daha fazla olduğu için korozyon olarak nitelendirilmektedir.

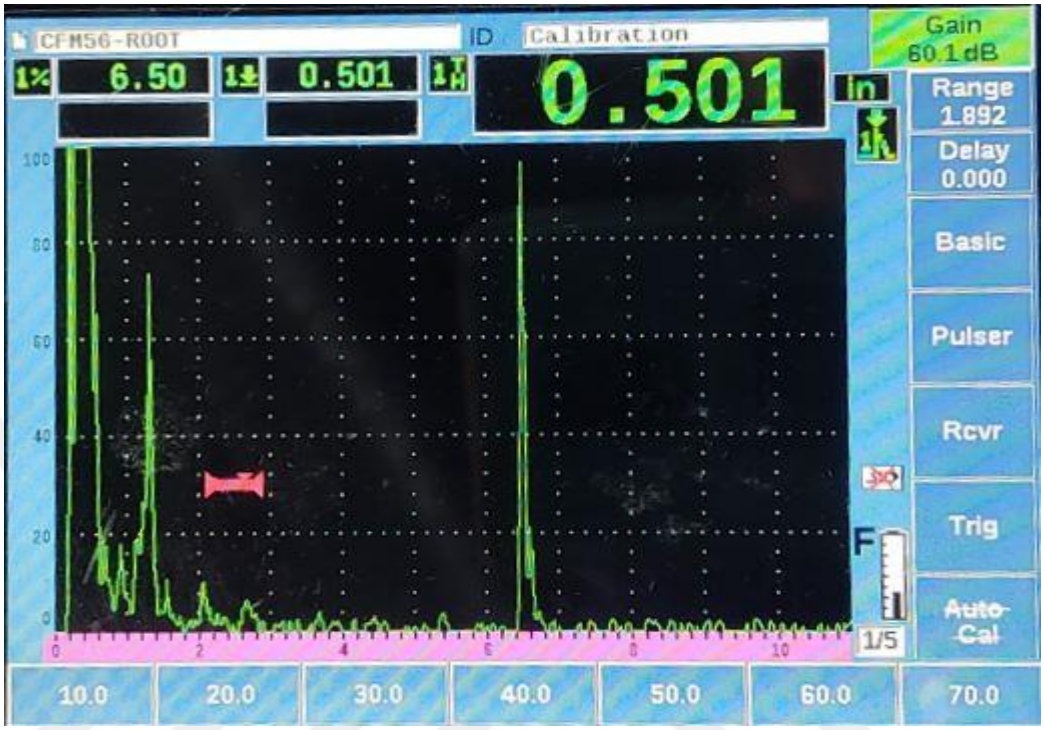
6.2. Kanat 3 ve 4 Numaralı Spoiler Merkez Menteşe Bağlantı Elemanı Yatak Bloğu Muayenesi

Bu muayene için gerekli ön hazırlıklar, cihaz kalibrasyonları ve ardından incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bu muayeneler sırasında EPOCH 650 taşınabilir NDI ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu inceleme sonuçları geleneksel ultrasonik muayene cihazından elde edilen görüntülerdir. Airbus, cihaz ekranının zaman bazında görünen ≥ %30 tam ekran yüksekliği göstergelerinin tümünü çatlak olarak kaydedilebileceğini belirtiyor. Bu muayene görüntülerinde bulunan 'I' imlecinde olan geçit değerinin üzerinde olan genlik değeri (tam ekran yüksekliği) yorulma çatlağı olarak değerlendirilmiştir. Airbus, spoiler merkez bağlantı parçası yatak bloğunun deliğinde başlayan ≥ 4 mm x 4 mm yorulma köşe çatlaklarının muhtemel kusur olabileceğini belirtiyor. Aşağıda bulunan Şekil 6.10'da A-tarama eksenleri, yatay eksende tarama ekseni ve dikey eksende ise genlik değeridir.



Şekil 6.10. Ultrasonik tarama görünümünün eksenleri

Aşağıda bulunan Şekil 6.11'de muayene sonucunda elde edilen inceleme sonuçları gösterilmektedir.



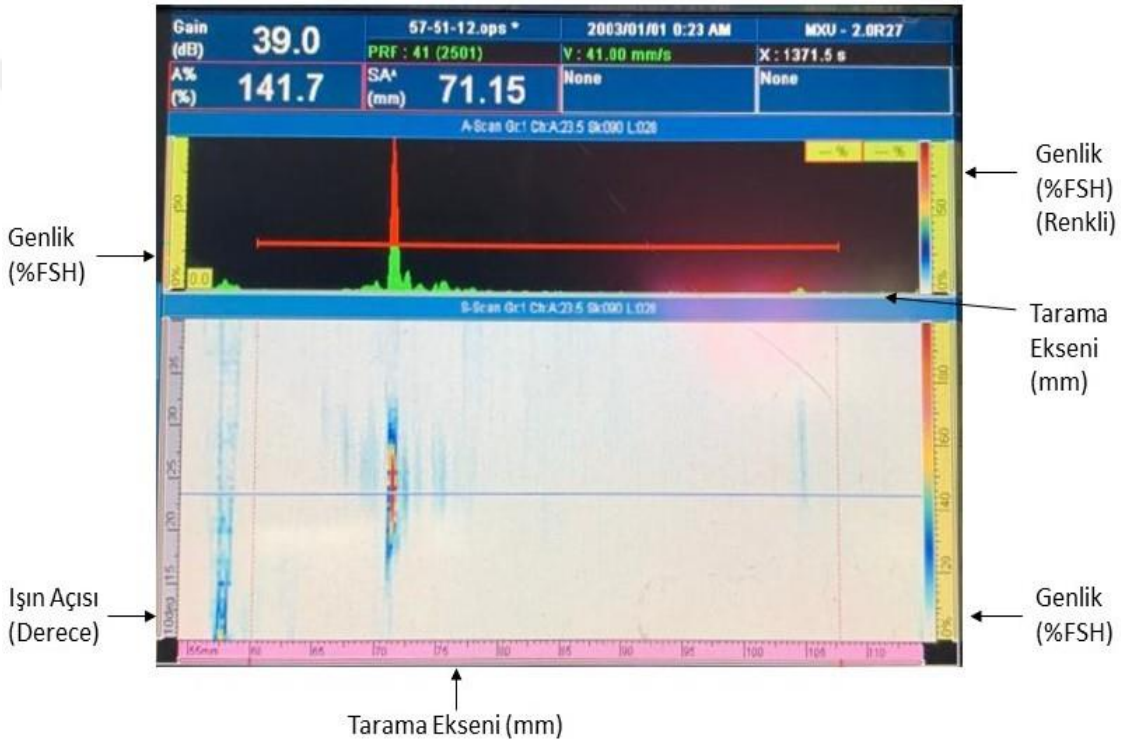
Şekil 6.11. Spoiler menteşe bağlantı elemanı yatak bloğu muayene görünümü

Şekil 6.11'de bulunan ultrasonik görünümde dikey eksende bulunan genlik (%FSH) ekseninde %30 tam ekran yüksekliğinde bir geçit bulunmaktadır. Bu geçit değerinin yukarısında bulunan sinyal ekoları malzemedeki yorulma çatlağı olarak değerlendirilir. Tarama ekseninde 0.2 mm ve 0.6 mm arasında, 1.3 mm ve 1.4 mm ve 6.5 mm ve 6.6 mm arasında genlik değerleri ölçülmüştür. Tarama ekseninde 6.5 mm ve 6.6 mm arasında %100 FSH genlik değerine sahip güçlü sinyaller bulunmaktadır. Bu sinyaller çatlağın bulunduğu yerden gelen en güçlü sinyaldir. Cihaz ekranında çatlağın derinliği 0.501 inç yani 1.272540 cm olarak ölçülmüştür.

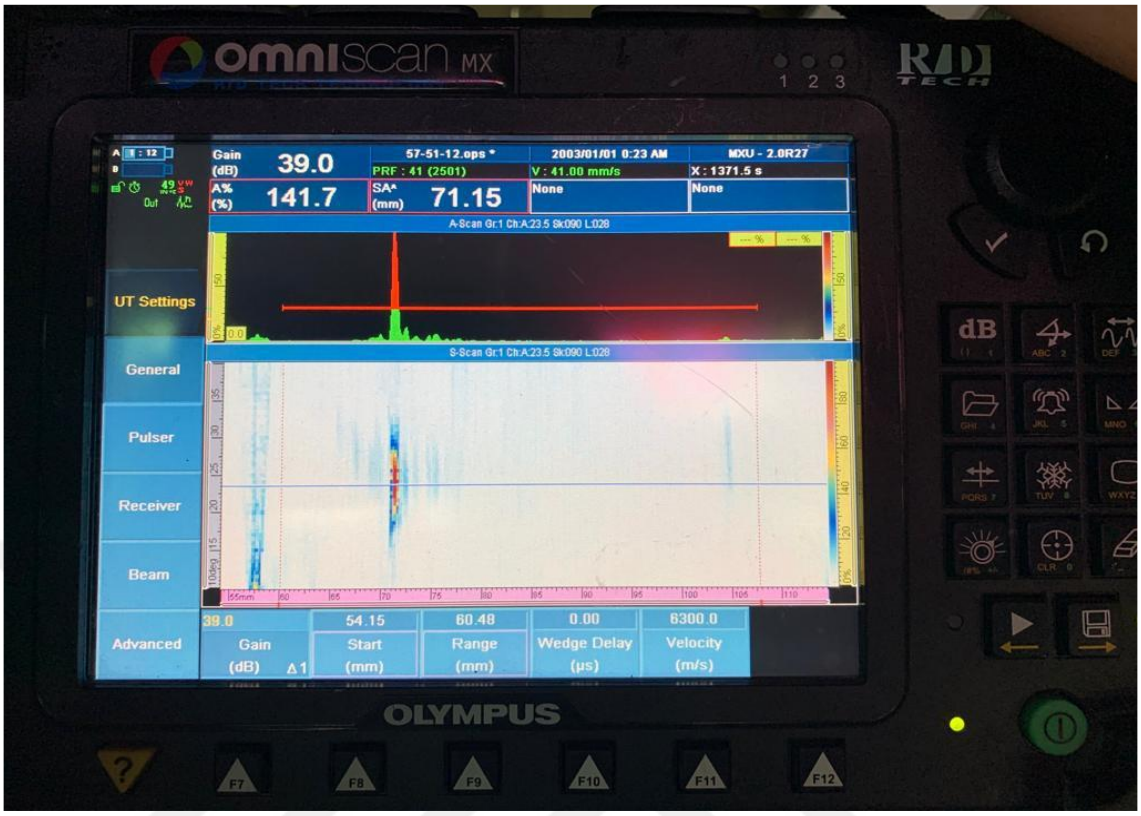
6.3. Ana İniş Takımının Rib5 İleri Bağlantı Kulakçığı Muayenesi

Bu muayene için gerekli ön hazırlıklar, cihaz kalibrasyonları ve ardından incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bu muayeneler sırasında OmniScan MX taşınabilir NDI ölçüm cihazı kullanılmıştır. Aşağıda bulunan Şekil 6.13'den Şekil 6.14'e kadar olan şekillerde muayene sonucunda elde edilen inceleme sonuçları gösterilmektedir. Bu inceleme sonuçları faz dizi ultrasonik cihazından elde edilen görüntülerdir. Airbus, cihaz ekranının

zaman bazında görünen ≥ %30 tam ekran yüksekliği göstergelerinin tümünü çatlak olarak kaydedilebileceğini belirtiyor. Bu muayene görüntülerinde bulunan 'I' imlecinde olan geçit değerinin üzerinde olan genlik değeri (tam ekran yüksekliği) yorulma çatlağı olarak değerlendirilmiştir. Airbus, bağlantı kulakçık deliğinden yayılan ≥ 2 mm'lik yorulma çatlaklarını muhtemel kusur olarak gösteriyor. Aşağıda bulunan şekillerdeki A-tarama eksenleri, yatay eksende tarama ekseni ve dikey eksende ise genlik değeridir. Aşağıda bulunan şekillerdeki S-tarama eksenleri; yatay eksende tarama ekseni, dikey eksende ışın açısı değerini ve z ekseninde ise genlik değeridir.



Şekil 6.12. Ultrasonik tarama görünümlerinin eksenleri

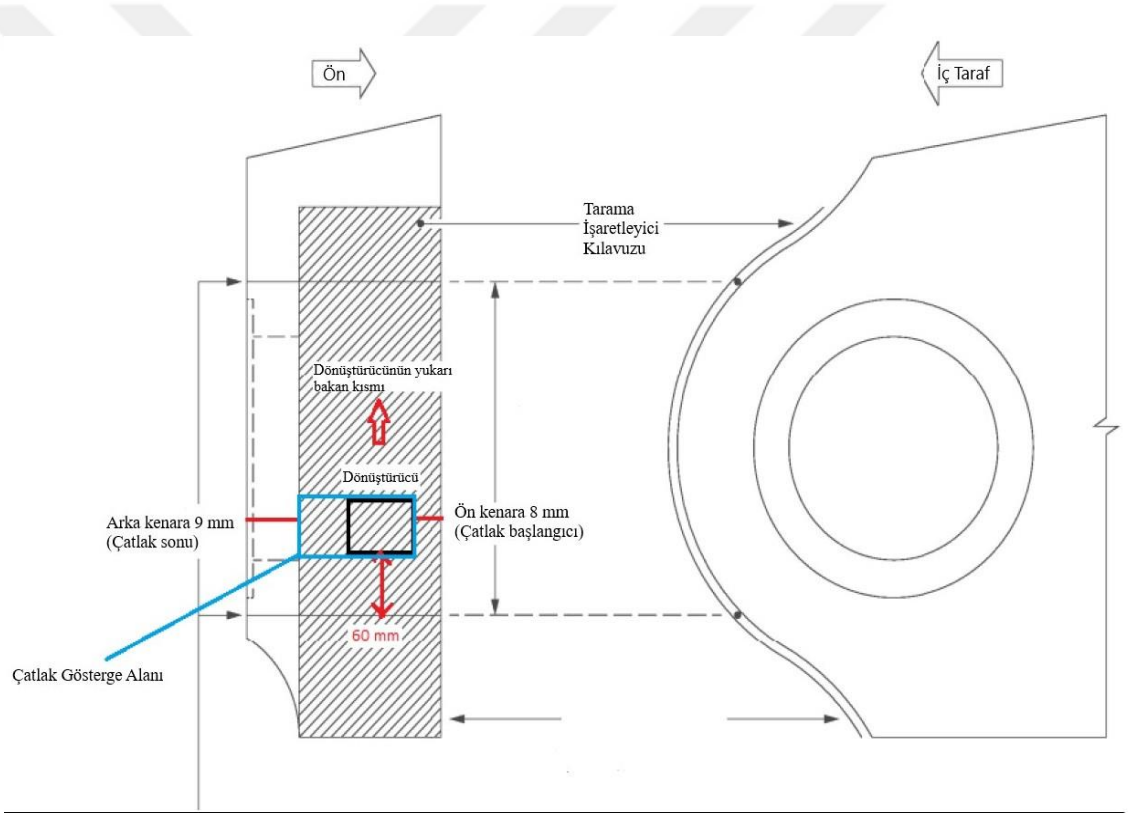


Şekil 6.13. Ana iniş takımının rib5 ileri bağlantı kulakçığı muayene görünümü

Birden fazla çatlak göstergesi, inceleme sırasında herhangi bir zamanda S-tarama ekranında gösterilebilmektedir. A-tarama ekranında ise en yüksek genliğe sahip olan sadece bir sinyal gösterilebilmektedir. Arama ünitesinin ileri hareketi, S taramasında çatlak veya korozyon sinyallerinin görüntülenmesine neden olur. Kulakçık deliği arayüzünden üretilen sahte sinyaller çatlak olarak yorumlanamaz. Şekil 6.13'de bulunan ultrasonik görünümdeki a-tarama bölümünde %30 tam ekran yüksekliğinde bir geçit bulunmaktadır. Bu geçit değerinin yukarısında bulunan sinyal ekoları malzemedeki yorulma çatlağı olarak değerlendirilir. Tarama ekseninde 70mm ve 72 mm arasında genlik değerleri ölçülmüştür. Bu değerler, %30 tam ekran yüksekliği ve %100 tam ekran yüksekliği genlik değeri arasındadır. S-tarama bölümünde ise ışın açısı ekseninde 23.5 mm değerinde bir geçit çizilmiştir. Bu geçit en yüksek şiddetli sinyalin alındığı ışın açısını göstermektedir. Yorulma çatlağı tarama ekseninde 70mm ve 72 mm arasında oluşmuştur. S-tarama bölümünde z ekseninde bulunan genlik (%FSH) sütununda %44 tam ekran yüksekliğinde çatlağın genliği gösterilmektedir. Bu genlik değeri, Airbus'ın verdiği ≥ %30 tam ekran yüksekliği genliğinden daha fazla bir genlik değeri olduğu için yorulma

çatlağı olarak değerlendirilmiştir. Yorulma çatlağının derinliği 71.15 mm olarak ölçülmüştür.

Şekil 6.14'te incelenen yapıdaki çatlak konumu gösterilmektedir. Kullanılan dönüştürücünün genişliği 60 mm olarak görülmektedir. Sol ana iniş takımının rib5 ileri bağlantı kulakçığında incelenen alan Şekil 5.28'de gösterilmektedir. Bu alan NTM 51-40-01 tahribatsız muayene el kitapçığında belirtilen değerlere göre belirlenmiştir. Bu alan içerisinde ultrasonik taramalar yapılmıştır. Aşağıdaki şekilde gösterilen alandan çatlak sinyalleri alınmıştır. Bu alanın yatay ekseninde ön kenara 8 mm mesafede başlayan çatlak arka kenara 9 mm mesafede son bulmuştur.



Şekil 6.14. İncelenen bölgedeki yapı kusurunun konumu

7. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1.Sonuçlar

Bu tez çalışmasında tahribatsız muayene yöntemlerinden olan geleneksel ultrasonik muayene yöntemi ve faz dizi ultrasonik muayene yöntemi kullanılarak incelemeler yapılmıştır. İnceleme yapılan uçak yapıları sırasıyla firar kenarı ile arka spar ve arka ara spar ön bağlantı sırası arasındaki üst kanat dış kaplaması, sol ve sağ kanatlardaki 3 ve 4 numaralı spoiler merkez menteşe bağlantı elemanı yatak bloğu ve sol kanat ana iniş takımının rib5 ileri bağlantı kulakçığıdır. İnceleme öncesi hazırlıklar yapılarak incelenecek bölge alanları belirlenmiştir. Bu incelemeler için EPOCH 650 geleneksel ultrasonik muayene cihazı ve OmniScan MX ultrasonik faz dizi cihazı kullanılmıştır. Bu cihazlara ek olarak uygulanan yönteme göre farklılık gösteren prob ve temas maddeleri kullanılmıştır. Kullanılan cihazlar ilgili NTM'de bulunan yönergelere uygun olarak kalibrasyon edilip muayene işlemleri gerçekleştirilmiştir. Uçak yapılarında gerçekleştirilen incelemelerden elde edilen sonuçlara göre bu yöntemler karşılaştırılmıştır.

Bu incelemeler sonrasında elde edilen sonuçlar;

- Uçak yapılarında korozyon incelemesi için kullanılacak cihazların kullanım öncesi kalibre edilmesi gerekmektedir. Kalibrasyon aşamasında faz dizi ultrasonik muayenede kullanılan OmniScan MX NDI cihazı geleneksel ultrasonik muayene yönteminde kullanılan EPOCH 650 NDI cihazına göre daha doğru bir şekilde kalibre edilebilmiştir. Uçak yapılarında bindirmeli bağlantı elemanlarının bulunduğu bölgelerde bağlantı elemanı kafalarının çıkıntı yapması nedeniyle geleneksel ultrasonik muayene yöntemi probunun kullanımı imkânsız hale gelmektedir. Bu sebeple korozyon haritalandırması için faz dizi ultrasonik muayene yöntemi açılı probları tercih edilmiştir. Bu problarla yapılan incelemelerde c-taramalardan elde edilen görünümler korozyonun bulunduğu

bölgeleri hızlı ve doğru bir şekilde haritalandırmıştır. Allam ve diğ. [47] yaptığı çalışmada faz dizi ultrasonik muayene yönteminin karmaşık yüzeyli ince parçaların muayenesinde uygun olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan tez çalışmasında korozyon tespitinde kullanılan inceleme yüzeyleri de benzer uygunluğa sahip parçalardır.

- Uçak kanat yapısında bulunan spoiler menteşe bağlantı elemanı yatak bloğunda gözlemlenen çatlak gözle görülebilir seviyede olduğundan geleneksel ultrasonik muayene yöntemiyle tespiti yapılabilmiştir. Bu kusurların yapı içinde bulunması durumunda ise faz dizi ultrasonik muayene yöntemi kullanılması gerekmektedir. Faz dizi ultrasonik muayene yöntemi geleneksel ultrasonik muayene yöntemine göre kısa sürede detaylı inceleme yapabilmektedir.
- Uçak iniş takımları yapılarının bulunduğu yüzeyler düz değildir. Bu bölgeyi incelemenin en iyi yolu, enine dalgaya sahip açılı prob kullanmaktır. Bunun için de faz dizi ultrasonik muayene yöntemi tercih edilmiştir. Faz dizi sistemi tarafından sağlanan takoz ve açıların kombinasyonu, muayene edilen bölgenin tek geçişte tamamen incelenmesine olanak tanımaktadır. Geleneksel tekniklerle karşılaştırıldığında daha basit ve daha hızlı bir inceleme gerçekleştirebilmektedir.
- Yu ve diğ. [54] yaptığı çalışmada elde ettiği deneysel sonuçlarla faz dizi ultrasonik muayene yönteminin çatlak tipi hasarı tespit edebildiğini ve bunların alüminyum plakalardaki konumlarını gösterebildiğini belirtmiştir. İniş takımının rib5 ileri bağlantı kulakçığında yapılan incelemelerde de faz dizi ultrasonik muayene yönteminin çatlak tipi hasarı tespit edebildiği görülmüştür.
- İki boyutlu c-tarama ve s-taramada veri çizimi, tarama parametreleri ve prob hareketi ile doğrudan bağlantılıdır. Bu taramalarda haritalandırma kısa süre içerisinde oluşmaktadır.
- Jung ve diğ. [5] yapmış olduğu çalışmada kusurları tespit etmek için satır satır tarama yöntemini uygulayan geleneksel ultrasonik muayene probunu kullanmışlardır. Prob incelemeyi 3,5 saatten fazla sürede bitirmiştir. Faz dizi ultrasonik muayene probunda ise yarım saatten az süren doğrusal tarama uygulanmıştır. Yapılan çalışmada faz dizi ultrasonik muayenenin, geleneksel ultrasonik muayeneye göre yedi kat daha fazla algılama hızına sahip olduğu görülmüştür. Öte yandan bu tez çalışmasında da faz dizi ultrasonik muayene

probları kullanılarak yapılan muayene süresince inceleme süresinin kısa sürdüğü gözlemlenmiştir.

- Wong [55] yapmış olduğu çalışmada faz dizi c-taramasının, kusur derinliği ölçümü için en doğru teknik olduğu ve hangi iki katlı katmanda var olduğu açısından delaminasyon kusurunun konumunu belirleyebileceği sonucuna varmıştır. Yapılan tez çalışmasında kullanılan faz dizi c-taraması, korozyon oluşan bölgelerdeki kusur derinliğini ölçen en hızlı ve doğru yöntem olmuştur.
- Faz dizi ultrasonik muayene yöntemi geleneksel ultrasonik muayene yöntemine göre olan üstünlüğü; tek bir prob düzeneği ile ışınları yönlendirmek, odaklamak ve taramak için birden fazla elemanı kullanma yeteneğinden gelmektedir.
- Faz dizi ultrasonik muayene yöntemleri, uçak yapılarında çatlak tespiti ve uçak yapılarında korozyon tespitinde malzemelerinin kayıp sonrasında kalan kalınlığını ölçmede havacılıkta etkin olarak kullanılabilmektedir.
- Faz dizi ultrasonik muayene yöntemleri cihazları ve probları, geleneksel ultrasonik muayene yöntemlerinde kullanılan cihaz ve problara göre daha pahalıdır.
- Faz dizi ultrasonik muayene yöntemlerinde geleneksel ultrasonik muayene yöntemlerine göre daha kapsamlı bir ultrasonik bilgi gerekmektedir.
- Faz dizi ultrasonik muayenede prob ve cihazlar için birden fazla kalibrasyon gereklidir bu da çok zaman almaktadır.
- Faz dizi ultrasonik muayene yönteminde kusur verilerinin fazlalığı, yorumlamayı ve analizi zaman alıcı hale getirmektedir.
- Ultrasonik faz dizi a-taramaları çok sayıda sinyal içermesinden, analiz ve düzenleme gerektirmektedir. A-taramalarda zamana dayalı edinimde veri çizimi zaman alıcı olmaktadır.
- Geleneksel ultrasonik muayeneye benzer olarak faz dizi ultrasonik yöntemlerde de darbe-yankı tekniği kullanılmaktadır.
- S-taramalar ince numunelerde küçük çatlakları boyutlandırma imkânı sağlamaktadır.
- Geleneksel ultrasonik muayene yönteminde elle tek tek ölçüm gerekmektedir. S-tarama basitlik ve aynı anda birden fazla açı kullanarak tüm hacmi kapsayabilme yeteneği sunmaktadır. Bu yönlerinden dolayı faz dizi ultrasonik muayene yöntemi kısa sürede inceleme sağlamaktadır.

- S-tarama ultrasonik görünümlerinde kusur bölgelerinin haritalandırılması sebebiyle bu kusurların anlaşılması kolay bir hal almaktadır.

7.2. Öneriler

- Faz dizi ultrasonik muayene ölçümleri sırasında cihazda pil ömrü sıkıntısı yaşanmıştır. Batarya kapasitelerinin arttırılması ve cihazın birim zamanda şarj tüketimini azaltacak çalışmalar yapılabilir.
- Faz dizi ultrasonik muayene ölçümleri sırasında cihazın dokunmatik ekranında algılamama sorunları yaşanmıştır. Bu sorunların giderilmesi amacıyla tahribatsız muayene ekranlarıyla ilgili çalışma yapılabilir.
- Faz dizi ultrasonik muayene ölçümleri sırasında cihaz güneşli bir ortamda kullanılmıştır. Cihaz ekranı gün ışığından etkilenmesiyle oluşan parlaklıkla ekrandaki görüşte azalma yaşanmıştır. Bu sorunların giderilebilmesi için gün ışığından minimum seviyelerde etkilenecek ekranın cihaza entegre edilmesiyle ilgili çalışma yapılabilir.
- Yapılan çalışmalarda geleneksel ultrasonik muayene cihazları hafifliği gözlemlenmiştir. Faz dizi ultrasonik muayene cihazları ise bu cihazlara kıyasla daha ağırdır. Bu cihazların ağırlığını azaltabilecek bir tasarımla ilgili çalışma yapılabilir.
- Ultrasonik c-taraması, çok küçük alanları taramak için oldukça hızlıdır. Geniş alanlarda yapılan incelemelerde ise muayene süreleri tarama aralığı çözünürlüğüne bağlı olarak fazla sürmektedir. Prob tarama aralığının (indeks kısmı) arttırılmasıyla muayene sürelerini azaltacak bir tasarımla ilgili çalışma yapılabilir.
- Kalkış ve iniş sırasında yoğun strese maruz kalan iniş takımları parçaları, tekrarlı yüklerin etkilediği spoiler parçaları yorulma çatlaklarına maruz kalmaktadır. Uçaklarda sıvı maddelerin ve nemin görüldüğü bölgelerde bulunan yapılar ise korozyona maruz kalmaktadır. Yapılarda gözlemlenen bu kusurların bulunduğu bölgelerde kullanılan malzemelerin değerlendirilmesiyle ilgili çalışma yapılabilir.

- Yapılan incelemelerde yapılarda tespit edilen kusurlar için hem korozyon muayenesi hem de yorulma çatlağı muayenesi ile karşılaştırılma yapılmasıyla ilgili çalışma yapılabilir.

- İncelemeler sonucunda tespit edilen kusurların uygulanan ultrasonik tahribatsız muayene yöntemleri dışında olan diğer tahribatsız muayene yöntemleriyle tekrardan değerlendirilmesiyle ilgili çalışma yapılabilir.

KAYNAKÇA

1. Gao, F., Zhou, H., Huang, C., 2020. Defect detection using the phased-array laser ultrasonic crack diffraction enhancement method. **Optics Communications, 474**, 126070.
2. Pei, C., Yi, D., Liu, T., Kou, X., Chen, Z., 2020. Fully noncontact measurement of inner cracks in thick specimen with fiber-phased-array laser ultrasonic technique**. NDT & E International, 113**, 102273.
3. Caminero, M. A., García-Moreno, I., Rodríguez, G. P., Chacón, J. M., 2019. Internal damage evaluation of composite structures using phased array ultrasonic technique: Impact damage assessment in CFRP and 3D printed reinforced composites. **Composites Part B: Engineering, 165**: 131–142.
4. Kim, G., Seo, M. K., Kim, Y. Il, Kwon, S., Kim, K. B., 2020. Development of phased array ultrasonic system for detecting rail cracks. **Sensors and Actuators A: Physical, 311**, 112086.
5. Jung, M. jae, Park, B. cheol, Bae, J. hoon, Shin, S. chul., 2018. PAUT-based defect detection method for submarine pressure hulls. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 10(**2): 153–169.
6. Li, W., Zhou, Z., Li, Y., 2019. Inspection of butt welds for complex surface parts using ultrasonic phased array. **Ultrasonics, 96**: 75–82.
7. Satyanarayan, L., Sridhar, C., Krishnamurthy, C. V., Balasubramaniam, K., 2007. Simulation of ultrasonic phased array technique for imaging and sizing of defects using longitudinal waves. **International Journal of Pressure Vessels and Piping, 84**(12): 716–729.
8. Feng, L., Qian, X., 2020. Enhanced sizing for surface cracks in welded tubular joints using ultrasonic phased array and image processing. **NDT & E International, 116**, 102334.
9. Humeida, Y., Wilcox, P. D., Todd, M. D., Drinkwater, B. W., 2014. A probabilistic approach for the optimisation of ultrasonic array inspection techniques. **NDT&E International, 68:** 43–52.

10. Cao, H., Guo, S., Zhang, S., Xie, Y., Feng, W., 2021. Ray tracing method for ultrasonic array imaging of CFRP corner part using homogenization method. **NDT & E International, 122**, 102493.
11. Habermehl, J., Lamarre A., 2008. Ultrasonic phased array tools for composite inspection during maintenance and manufacturing. *17th World Conference on Nondestructive Testing,* 25-28 Ekim, 2008, Shanghai, Çin.
12. Nondestructive Evaluation Techniques. (Web sayfası: **https://www.nde-ed.org/NDETechniques/index.xhtml** (Erişim tarihi: Aralık 2023).
13. Mouleeswaran, S., Sreekanth T. G., Reddy, S. M., 2010. Non Destructive Test Chapter 31. *Elsevier Inc.*
14. Gözle Muayene. (Web sayfası: **https://ndt.wtndt.metu.edu.tr/gozle-muayene** (Erişim tarihi: Aralık 2023).
15. Fromme**,** P**.,** 2019. Guide wave testing, pp. 141-170. *In*: Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation (Eds: N., Ida, N., Meyendorf). Springer Nature, Cham.
16. Honarvar, F., Varvani-Farahani, A., 2020. A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control. **Ultrasonics, 108**, 106227.
17. Emre**,** S**.,** 2018**.** Demiryolu akslarının konvensiyonel ve faz dizi(phased array) ultrasonik muayene yöntemi ile muayenesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 103 s.
18. Olympus NDT, Ultrasonic flaw detection tutorial. (Web sayfası: **https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/flaw-detection/** (Erişim tarihi: Şubat 2022).
19. Namkung, M., Wincheski, B., Padmapriya, N., 2016. NDT in the Aircraft and Space Industries. *Elsevier Inc.*
20. Thompson, R. B., Begum, S., 2017. NDT Techniques: Ultrasonic. **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.**
21. Bossi, H. R., Giurgiutiu, V., 2015. Nondestructive testing of damage in aerospace composites, pp. 413-448. *In*: Polymer Composites in the Aerospace Industry, (Eds. P.E. Irving, C. Soutis). Elsevier Ltd, Amsterdam.
22. Olympus NDT, 2010. Phased Array Testing: Basic Theory for Industrial Applications. Waltham, MA: Olympus NDT, i, pp. 113.

23. Olympus NDT, 2007. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Waltham, MA: Olympus NDT, xvi, pp. 394.
24. Gangfeng, Z., Wandong, X., Xiaoming, W., Yingchun, Y., 2018. A study of dense-medium cyclone inner-wall abrasion based on ultrasonic phased array technology. **Measurement, 126**: 58–64.
25. Raišutis, R., Tumšys, O., Kažys, R., 2017. Development of the technique for independent dual focusing of contact type ultrasonic phased array transducer in two orthogonal planes. **NDT & E International, 88**, 71–80.
26. Meola, C., Boccardi, S., Carlomagno, G. M., Boffa, N. D., Monaco, E., Ricci, F., 2015. Nondestructive evaluation of carbon fibre reinforced composites with infrared thermography and ultrasonics. **Composite Structures, 134**, 845–853.
27. TWI, What is phased array ultrasonic testing and how does it work? . (Web sayfası: **https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-phased-array-ultrasonic-testing#WhatisaPhasedArrayUltrasoundTransducer** (Erişim tarihi: Nisan 2022).
28. Yılmaz**,** U**.,** 2010**.** Grup yayınım ultrasonik tekniği kullanılarak kaynak hatalarının karakterizasyonu. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 91 s.
29. Olympus NDT, 2007. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline. Waltham, MA: Olympus NDT, xviii, pp. 356.
30. Singh, R., 2020. Ultrasonic testing. **Applied Welding Engineering**, 347–358.
31. Mouritz, A. P., 2012. Introduction to aerospace materials, First edition. Woodhead Publishing Limited., Cambridge. 621 pp.
32. International Atomic Energy Agency, 2012. Aviation maintenance technician handbook airframe volume 1. *Airman Testing Standards Branch*, Oklahoma City.
33. The Airbus Company A320/A321 Aircraft Maintenance Manual. (2011). Chapter 53-Fuselage.
34. The Airbus Company A320/A321 Aircraft Maintenance Manual. (2011). Chapter 53-Wings.
35. The Airbus Company A320/A321 Aircraft Maintenance Manual. (2011). Chapter 53-Stabilizers.
36. The Airbus Company A320/A321 Aircraft Maintenance Manual. (2011). Chapter 53-Flight control.

37. The Airbus Company A320/A321 Aircraft Maintenance Manual. (2011). Chapter 53-Landing gear.
38. International Atomic Energy Agency, 2018. Training Guidelines in Non-destructive Testing Techniques. Vienna, Austria.
39. Zhou, Y. L., Qian, X., Birnie, A., Zhao, X. L., 2018. A reference free ultrasonic phased array to identify surface cracks in welded steel pipes based on transmissibility. **International Journal of Pressure Vessels and Piping, 168:** 66–78.
40. Katunin, A., Dragan, K., Dziendzikowski, M., 2015. Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques. **Composite Structures, 127**, 1–9.
41. Zhang, Z., Liu, M., Li, Q., Ang, Y., 2020. Visualized characterization of diversified defects in thick aerospace composites using ultrasonic B-scan. **Composites Communications, 22**, 100435.
42. Tabatabaeipour, M., Hettler, J., Delrue, S., Van Den Abeele, K., 2015. Nondestructive Ultrasonic Inspection of Friction Stir Welds. **Physics Procedia, 70**, 660–663
43. Dwivedi, S. K., Vishwakarma, M., Soni, P. A., 2018. Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review. **Materials Today: Proceedings, 5(2):** 3690–3698.
44. Yang, H., Wang, P., Qian, H., Niu, S., Dong, P., 2022. A Study of Fatigue Crack Propagation Paths at U-Rib Welds in Orthotropic Bridge Decks using a Phased-Array Imaging Technique. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 119:** 103310.
45. Reiner, J., Chen, C., Vaziri, R., Poursartip, A., 2022. Combining digital image correlation and phased array ultrasonics for non-destructive testing of translaminar fracture in composite laminates. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **161**: 107060.
46. Payão Filho, J. da C., Maia, V. P., Passos, E. K. D., Gonzaga, R. S., Juliano, D. R., 2022. Probability of detection of discontinuities by ultrasonic phased array inspection of 9% Ni steel joints welded with alloy 625 as the filler metal. **Ultrasonics, 119:** 106582.

47. Allam, A., Alfahmi, O., Patel, H., Sugino, C., Harding, M., Ruzzene, M., Erturk, A., 2022. Ultrasonic testing of thick and thin Inconel 625 alloys manufactured by laser powder bed fusion. **Ultrasonics**, **125**: 106780.
48. Zhang, H., Peng, L., Zhang, H., Zhang, T., Zhu, Q., 2022. Phased array ultrasonic inspection and automated identification of wrinkles in laminated composites. **Composite Structures, 300:** 116170.
49. Sreeraj, P.R., Mishra, S.K., Singh, P.K., 2022. A review on non-destructive evaluation and characterization of additively manufactured components. **Progress in Additive Manufacturing, 7:** 225–248.
50. Zhang, Z., Guo, S., Li, Q., Cui, F., Malcolm, A. A., Su, Z., Liu, M., 2020. Ultrasonic detection and characterization of delamination and rich resin in thick composites with waviness. **Composites Science and Technology, 189:** 108016.
51. Morozov, M., Jackson, W., Pierce, S. G., 2017. Capacitive imaging of impact damage in composite material. **Composites Part B: Engineering, 113:** 65–71.
52. Gaudenzi, P., Bernabei, M., Dati, E., De Angelis, G., Marrone, M., Lampani, L., 2014. On the evaluation of impact damage on composite materials by comparing different NDI techniques. **Composite Structures, 118(1):** 257–266.
53. Hsu, D. K., 2013. Non-destructive evaluation (NDE) of aerospace composites: ultrasonic techniques. **Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites: Techniques and Applications,** 397–422.
54. Yu, L., Tian, Z., 2016. Phased array techniques for damage detection in aerospace structures, pp. 285-306. *In:* Structural Health Monitoring (SHM) in Aerospace Structures (Eds. Fun-Gwo, Yuan). Elsevier Ltd, Amsterdam.
55. Wong, B. S., 2013. Non-destructive evaluation (NDE) of composites: detecting delamination defects using mechanical impedance, ultrasonic and infrared thermographic techniques, pp. 279-308. *In*: Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites: Techniques and Applications, (Ed. V.M. Karbhari). Elsevier Ltd, Amsterdam.
56. The Airbus Company A318/A319/A320/A321 Nondestructive Testing Manual. (2023). Chapter 57-29-07-270-801-A01 - Inspection of upper wing skin between trailing edge and the forward fastener row of the rear and false rear spar.

57. The Airbus Company A318/A319/A320/A321 Nondestructive Testing Manual. (2023). Chapter 57-70-12 - Inspection of center hinge fitting bearing block of spoiler 3 and 4, left and right wings.
58. The Airbus Company A318/A319/A320/A321 Nondestructive Testing Manual. (2023). Chapter 57-51-12 - Inspection of the gear rib5 forward attachment lug bore of the main landing gear.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Cankara AKBULUT
Uyruğu: Türkiye (T.C)
Doğum Tarihi ve Yeri:
Medeni Durum:
e-mail:
Yazışma Adresi:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Uçak Gövde Motor Bakım ABD	-
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Uçak Gövde-Motor Bakım	2019
Lise	Argıncık Lisesi, Kayseri	2015

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2021-Halen	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Dalaman Sivil Havacılık Yüksekokulu	Araştırma Görevlisi
2019-2020	MRO Teknik Servis San. Ve Tic. A.Ş.	Uçak Bakım Teknisyeni

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Akbulut C., Erturun V., Kafalı H., 2022. Havacılıkta kullanılan faz dizi ultrasonik tekniğinin teorik incelenmesi, ss. 1238-1245. *4th International Eurasian Conference on Science,Engineering and Technology*, 14-16 Aralık 2022, Ankara, Türkiye, 1624 s/pp.