

**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI**

**BALPETEĞİ KOMPOZİT YAPILARDA TERMOGRAFI  
METODUYLA SU TESPİTİ**

**Hazırlayan  
Kadir Münir ERCÜMEN**

**Danışman  
Doç. Dr. Emre ACAR**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Temmuz 2018  
KAYSERİ**



**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI**

**BALPETEĞİ KOMPOZİT YAPILARDA TERMOGRAFI  
METODUYLA SU TESPİTİ**

**(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan  
Kadir Münir ERCÜMEN**

**Danışman  
Emre ACAR**

**Temmuz 2018  
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.

Kadir Münir ERCÜMEN



## YÖNERGEYE UYGUNLUK

“Balpeteği Kompozit Yapılarda Termografi Metoduyla Su Tespiti” adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

**Hazırlayan**

Kadir Münir ERCÜMEN



**Danışman**

Doç. Dr. Emre ACAR



**Sivil Havacılık Anabilim Dalı Başkanı**

Prof. Dr. İlker YILMAZ

**KABUL VE ONAY**

**Doç. Dr. Emre ACAR** danışmanlığında **Kadir Münir ERCÜMEN** tarafından hazırlanan **“Balpeteği Kompozit Yapılarda Termografi Metoduyla Su Tespiti”** adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Sivil Havacılık** Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

26/07/2018

**JÜRİ:**

Danışman : Doç Dr. Emre ACAR



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Adem KARCI



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Benay UZER

**ONAY:**

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 31/07/2018 tarih ve 1018/33-04 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

  
31/07/2018

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim süresince ilgisini, hoşgörüsünü ve rehberliğini esirgemeyen çok değerli tez danışmanım Doç. Dr. Emre ACAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Termografi uygulamalarında bana yardımcı olan, THY TEKNİK A.Ş.'ye ve M. İlker SUNAOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmam süresince maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen; anneme, babama ve ablam Naile Eda ŞEN'e, bana olan desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve en az ailem kadar maddi ve manevi desteği olan Şükrü ÇETİNKAYA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kadir Münir ERCÜMEN

Kayseri, Temmuz 2018

# **BALPETEĞİ KOMPOZİT YAPILARDA TERMOGRAFI METODUYLA SU TESPİTİ**

**Kadir Münir ERCÜMEN**

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2018  
Danışman: Doç. Dr. Emre ACAR**

## **ÖZET**

Uçak sanayisinde kullanılan en önemli malzeme yapılarından birisi balpeteği kompozit yapılardır. Yüksek dayanım ve düşük ağırlığa sahip olmaları, balpeteği kompozit yapıların en önemli özellikleridir. Balpeteği şeklinde hücrelerden oluşan bu yapıların dayanım/ağırlık oranları diğer metalik malzemelerle kıyaslandığında oldukça yüksektir. Bu yüzden bu yapılar havacılık ve savunma sanayisi başta olmak üzere diğer pek çok alanda yoğun bir şekilde tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasında, öncelikle termografik muayene başta olmak üzere diğer tahribatsız muayene yöntemleri, termografinin teorik alt yapısı, uçak üzerinde termal termografinin uygulandığı balpeteği yapılar ve balpeteği kompozit yapıların tamir metotları açıklanmıştır. Deneysel kısımda ise uçağın ana kontrol yüzeylerinden birisi olan istikamet dümeninin içerisinde su olup olmadığını kontrol etmek amacıyla termal kamera yardımı ile termografik muayene uygulanmıştır. İstikamet dümeninde suyun olması uçuş emniyetini olumsuz bir şekilde etkileyebilir. Yapılan inceleme sonucunda istikamet dümeninin sadece bir bölgesinde tespit edilen suyun izin verilebilir limitin üzerinde olduğu görülmüştür. Bu bölgeye yapı içerisindeki suyun giderilmesi için özel bir kompozit tamiri uygulanmıştır.

Tamiri yapılan bölgeye kontrol amacıyla tekrar termografi uygulanmıştır. Tamirden önceki ve sonraki termal görüntüler karşılaştırıldığında suyun tamamen yapıdan giderildiği gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Balpeteği kompozit, Termografi, İstikamet dümeni

## **DETECTION OF WATER AT HONEYCOMB COMPOSITE STRUCTURES WITH THERMOGRAPHY METHOD**

**Kadir Münir ERCÜMEN**

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Master Thesis. Thesis, July 2018**

**Thesis Advisor: Assoc. Prof. Emre ACAR**

### **ABSTRACT**

Honeycomb composite is one of the most important material parts that are used in the aircraft industry. High toughness and having low weight are significant features for honeycomb composites. These structures which are made of honeycomb form have higher toughness/weight ratio when compared to other metallic materials. That is why these structures are often preferred at many fields, especially at the aircraft and the defense industry.

In the initial part of this study, primarily thermographic inspection other non-destructive methods, theoretical background of thermography, the honeycomb structure at the aircraft which are applied thermal thermography and repair method of honeycomb composite structures are explained. In the experimental section thermographic inspection is applied via thermal camera to check whether there is water or not in the rudder which is one of the primary control surfaces of the aircraft. Water presence in rudder can adversely affect flight safety. As a result of the inspection only one section of the rudder has water more than allowable limit. Special composite repair has been applied to this section to remove water in the relation section.

For the control of repair area thermography has been applied again. When we compare the old thermal photos of the repaired area with the new ones, it is observed that water is completely removed from rudder.

**Keywords:** Honeycomb composite, Thermography, Rudder

## İÇİNDEKİLER

### BALPETEĞİ KOMPOZİT YAPILARDA TERMOGRAFI METODUYLA SU TESPİTİ

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ..... | ii   |
| YÖNERGEYE UYGUNLUK.....       | iii  |
| KABUL VE ONAY .....           | iv   |
| TEŞEKKÜR.....                 | v    |
| ÖZET.....                     | vi   |
| ABSTRACT.....                 | vii  |
| İÇİNDEKİLER .....             | viii |
| ŞEKİL LİSTESİ.....            | xi   |
| TABLO LİSTESİ.....            | xiv  |
| KISALTMALAR VE SİMGELER.....  | xv   |

## 1. BÖLÜM

### GİRİŞ

## 2. BÖLÜM

### TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Tahribatsız Muayene Yöntemleri Genel Bilgiler ..... | 3  |
| 2.1.1. Görsel Muayene.....                               | 5  |
| 2.1.2. Ultrasonik Muayene.....                           | 5  |
| 2.1.3. Radyografik Muayene .....                         | 7  |
| 2.1.4. Sıvı Penetrant Yöntemi.....                       | 9  |
| 2.1.5. Manyetik Parça ile Kontrol.....                   | 10 |
| 2.1.6. Eddy Akımları ile Kontrol .....                   | 12 |
| 2.1.7 Termografik Muayene .....                          | 14 |
| 2.1.8. Tap Test .....                                    | 16 |

### 3. BÖLÜM

#### TERMOGRAFINİN TEORİK ALT YAPISI

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Elektromanyetik Tayf.....                                                | 18 |
| 3.1.1 Radyo Dalgaları.....                                                    | 20 |
| 3.1.2. Mikrodalgalar.....                                                     | 21 |
| 3.1.3. Kızılötesi.....                                                        | 22 |
| 3.1.4. Görünür Işın.....                                                      | 22 |
| 3.1.5. Morötesi Işın.....                                                     | 23 |
| 3.1.6. X Işınları .....                                                       | 23 |
| 3.1.7. Gama Işınları.....                                                     | 23 |
| 3.2. Kızılötesi Enerjisi .....                                                | 23 |
| 3.2.1 Krishhoff Yasası.....                                                   | 25 |
| 3.2.2. Plank Yasası.....                                                      | 25 |
| 3.2.3 Stefan Boltzman Yasası .....                                            | 26 |
| 3.2.4. Wien Yasası .....                                                      | 27 |
| 3.3. Kızılötesi Termografi Türleri .....                                      | 27 |
| 3.3.1. Pasif Termografi .....                                                 | 28 |
| 3.3.2. Aktif Termografi.....                                                  | 29 |
| 3.3.2.1. Darbe Termografisi.....                                              | 29 |
| 3.3.2.2. Uzun Darbe.....                                                      | 31 |
| 3.3.2.3. Titreşim Termografisi.....                                           | 31 |
| 3.3.2.4. Lockin Termografi.....                                               | 32 |
| 3.3.2.5. Darbe Faz Termografisi .....                                         | 33 |
| 3.4. Termografinin Avantajları ve Dezavantajları .....                        | 33 |
| 3.5. Termal Kamera .....                                                      | 34 |
| 3.6. Uçaklarda Kullanılan ve Termal Termografi Uygulanan Balpeteği Yapılar .. | 35 |
| 3.6.1. İstikamet Dümeni (Rudder) .....                                        | 35 |
| 3.6.2. İrtifa Dümeni (Elevatör).....                                          | 37 |

### 4. BÖLÜM

#### BALPETEĞİ KOMPOZİT YAPILARIN TAMİR METOTLARI

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| 4.1. Balpeteği Yapının Tamire Uygunluğunun Belirlenmesi ..... | 40 |
| 4.2. Matris Tercihi ve Tatbik Edilmesi .....                  | 40 |
| 4.3. Fiberlerin Yerleştirme Yönleri .....                     | 40 |

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 4.4. Cam Elyafı Tamiri .....                | 41 |
| 4.5. Karbon Tamiri .....                    | 42 |
| 4.6. Kevlar Malzemelerin Tamiri .....       | 42 |
| 4.7. Tamir İşleminde Yapışkanın Önemi ..... | 43 |
| 4.8. Petekli Yapıların Seçimi .....         | 43 |
| 4.9. Tamir Şeması.....                      | 44 |

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL YÖNTEM

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 5.1. Deneysel Çalışma..... | 45 |
|----------------------------|----|

## 6. BÖLÜM

### TERMOGRAFI YÖNTEMİ İLE SUYUN TESPİTİ VE BALPETEĞİ YAPININ TAMİRİ

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.1. Termografi Yöntemi Kullanılarak Su Tespiti .....                         | 48 |
| 6.2. Balpeteği Yapının Tamiri .....                                           | 53 |
| 6.3. Tamir İşlemi Sonrasında Kontrol Amaçlı Yapılan Termografik Muayene ..... | 63 |

## 7. BÖLÜM

### SONUÇ ve ÖNERİLER

|                  |    |
|------------------|----|
| 7.1. Sonuç ..... | 64 |
| KAYNAKÇA .....   | 66 |
| ÖZGEÇMİŞ.....    | 72 |

## ŞEKİL LİSTESİ

|             |                                                                                                                        |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1.  | Balpeteği kompozit paneli ve I kirişi .....                                                                            | 1  |
| Şekil 1.2.  | Malzeme türlerine göre balpeteği yapıları .....                                                                        | 2  |
| Şekil 2.1.  | Uçak lastiğinin oluşunda meydana gelen hasarın gözle muayenesi .....                                                   | 5  |
| Şekil 2.2.  | Ultrasonik muayenede osiloskop ekran görüntüsü .....                                                                   | 6  |
| Şekil 2.3.  | Radyografi uygulaması ile süreksizlik tespiti .....                                                                    | 8  |
| Şekil 2.4.  | Penetrant yönteminin temel adımları .....                                                                              | 10 |
| Şekil 2.5.  | Manyetik parçacık uygulaması ile hasar tespiti .....                                                                   | 11 |
| Şekil 2.6.  | Girdap akımları muayene yöntemi test cihazı .....                                                                      | 13 |
| Şekil 2.7.  | Girdap akımlarının oluşumu .....                                                                                       | 14 |
| Şekil 2.8.  | Termografik bir muayenede termografik kamera ile doğru pozisyon almanın gösterimi .....                                | 15 |
| Şekil 2.9.  | Madeni para, tap test cihazı ve tap test çekicinin uygulama esnasındaki gösterimi .....                                | 16 |
| Şekil 3.1.  | Bir dizüstü bilgisayarın çalışma esnasındaki termal görüntüsü.....                                                     | 18 |
| Şekil 3.2.  | Elektromanyetik tayf frekans türünden gösterimi .....                                                                  | 19 |
| Şekil 3.3.  | Elektromanyetik tayfin dalga türünden gösterimi .....                                                                  | 19 |
| Şekil 3.4.  | 3C 273 Kuasar'ın radyo teleskopuyla görüntülenmesi.....                                                                | 21 |
| Şekil 3.5.  | Frekans veya dalga boyu ile kara cismin fonksiyonu .....                                                               | 26 |
| Şekil 3.6.  | Termografide pasif yaklaşım .....                                                                                      | 28 |
| Şekil 3.7.  | Termografide aktif yaklaşım.....                                                                                       | 29 |
| Şekil 3.8.  | Lockin termografinin şematik gösterimi.....                                                                            | 32 |
| Şekil 3.9.  | Termal Kameranın Yapısı.....                                                                                           | 34 |
| Şekil 3.10. | İstikamet dümeni ve istikamet dümeni pedallarının gösterimi .....                                                      | 36 |
| Şekil 3.11. | Airbus A320 uçağının istikamet dümeninde yapılan bir termografik muayene sonucunda tespit edilen suyun görüntüsü ..... | 36 |
| Şekil 3.12. | İrtifa dümeni ve diğer ana kontrol yüzeyleri .....                                                                     | 38 |
| Şekil 3.13. | Airbus A321 uçağının irtifa dümeninde yapılan bir termografik muayene termal görüntüsü.....                            | 38 |
| Şekil 4.1.  | Fiber malzemenin matris malzeme içerisine yerleştirilmesi.....                                                         | 41 |
| Şekil 4.2.  | Hasarlı kevlar yapının değiştirilmesi .....                                                                            | 43 |

|             |                                                                                                                                               |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.3.  | Balpeteği yapının tamir akış şeması .....                                                                                                     | 44 |
| Şekil 5.1.  | Termografik inceleme yapılan uçağın istikamet dümeni.....                                                                                     | 45 |
| Şekil 5.2.  | Isı tabancası.....                                                                                                                            | 46 |
| Şekil 5.3.  | Termal kamera .....                                                                                                                           | 46 |
| Şekil 6.1.  | Balpeteği kompozit yapısının bölümleri.....                                                                                                   | 47 |
| Şekil 6.2.  | İstikamet Dümeni üzerindeki askı noktalarının (hoist point) gösterimi ....                                                                    | 48 |
| Şekil 6.3.  | İstikamet dümeninin sol yüzünde bulunan askı noktaları (hoist point) ve su tespit edilen 3 numaralı askı noktasının normal görünümü .....     | 49 |
| Şekil 6.4.  | İstikamet dümeninin sol yüzünde bulunan, 3 numaralı askı noktasında ki suyun termal kamera ile görüntülenmesi.....                            | 50 |
| Şekil 6.5.  | İstikamet dümeninin sağ yüzünde bulunan askı noktaları (hoist point) ve su tespit edilen 2 ve 3 numaralı askı noktalarının normal görünüşleri | 51 |
| Şekil 6.6.  | İstikamet dümeninin sağ yüzünde bulunan, 2 numaralı askı noktasının etrafındaki suyun termal kamera ile görüntülenmesi.....                   | 52 |
| Şekil 6.7.  | İstikamet dümeninin sağ yüzünde bulunan, 3 numaralı askı noktasının çevresindeki suyun termal kamera ile görüntülenmesi.....                  | 53 |
| Şekil 6.8.  | İstikamet dümeninin tamir işlemi için uçak üzerinden sökülüp yatay olarak konumlandırılması .....                                             | 54 |
| Şekil 6.9.  | Tamir yapılacak bölgenin ölçüleri .....                                                                                                       | 55 |
| Şekil 6.10. | Tamir yapılacak bölge karesel biçimde çerçeve içine alındı .....                                                                              | 55 |
| Şekil 6.11. | İstikamet dümenindeki inceleme delikleri.....                                                                                                 | 56 |
| Şekil 6.12. | Tamir edilen bölgenin; üst yüzey, core, bush ve alt yüzeyin sökümü sonrası görünümü.....                                                      | 57 |
| Şekil 6.13. | Takım işlemi için hazırlanmış olan bush (yatak).....                                                                                          | 58 |
| Şekil 6.14. | Bush'un takım işlemi gerçekleştirildikten sonra alt yüzeyden görünüşü ..                                                                      | 59 |
| Şekil 6.15. | Bush, koruyucu malzeme ve balpeteği yapının takıldıktan sonraki görünümü .....                                                                | 59 |
| Şekil 6.16. | Koruyucu ara malzeme ve balpeteği yapının zımparalama işleminden sonra üstten görünümü.....                                                   | 60 |
| Şekil 6.17. | Koruyucu ara malzeme ve balpeteği yapının zımparalama işleminden sonra oluşan yükselti farkının görünümü.....                                 | 60 |
| Şekil 6.18. | Tamir bölgesinin üzerine son iki kat cam fiberlerin yerleştirilmesi sonrasındaki görünümü.....                                                | 61 |

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 6.19. Askı noktalarının takımı için bush'un üzerini örten fiberlerin kesilip çıkartılması.....                | 62 |
| Şekil 6.20. Tamir bölgesinin merkezindeki bush'un üzerine askı noktası bush'larının takılması sonrası görünümü..... | 62 |
| Şekil 6.21. Tamir işlemi sonrasında kontrol amaçlı yapılan termografik inceleme sonucu oluşan termal görüntü .....  | 63 |



## TABLO LİSTESİ

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 2.1. Tahribatsız muayene yöntemleri ile süreksizlik arasındaki bağlantı.....  | 4  |
| Tablo 3.1. Elektromanyetik tayf.....                                                | 20 |
| Tablo 3.2. Farklı renkler için takribi boşluktaki dalga boyları ve frekansları..... | 22 |



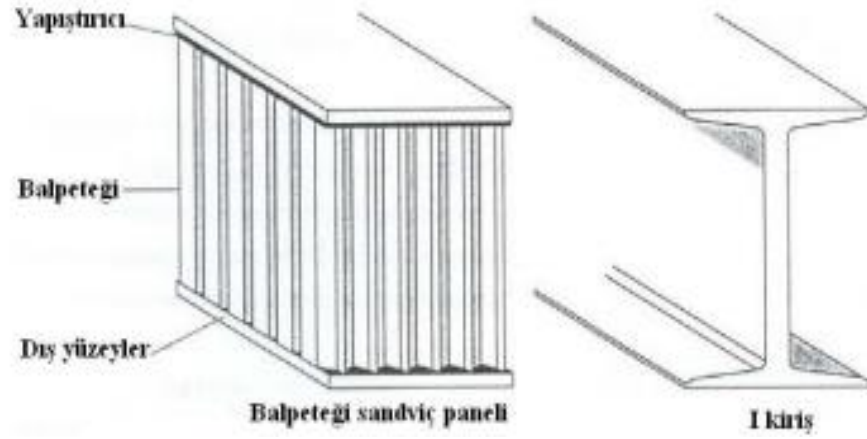
## KISALTMALAR VE SİMGELER

| <b><u>Sembol</u></b> | <b><u>Anlamı</u></b>      |
|----------------------|---------------------------|
| c                    | Ses hızı                  |
| f                    | Frekans                   |
| $\lambda$            | Dalga boyu                |
| °C                   | Santigrat derece          |
| km                   | Kilometre                 |
| MHz                  | Megahertz                 |
| mm                   | Milimetre                 |
| sn                   | Saniye                    |
| IR                   | Kızılötesi bölge          |
| NIR                  | Yakın kızılötesi bölge    |
| VIS                  | Görünür bölge             |
| UV                   | Mor ötesi                 |
| SRM                  | Structural Repair Manuel  |
| °F                   | Fahrenhayt derece         |
| °K                   | Kelvin derece             |
| L                    | Kaplama kalınlığı         |
| $\epsilon$           | Cismin yayılma kabiliyeti |
| $\mu\text{m}$        | Mikrometre                |
| h                    | Plank Sabiti              |
| E                    | Enerji                    |
| pm                   | Pikometre                 |
| nm                   | Nanometre                 |
| THz                  | Terahertz                 |
| GHz                  | Gigahertz                 |
| eV                   | Elektronvolt              |
| cm                   | Santimetre                |

## 1. BÖLÜM

### GİRİŞ

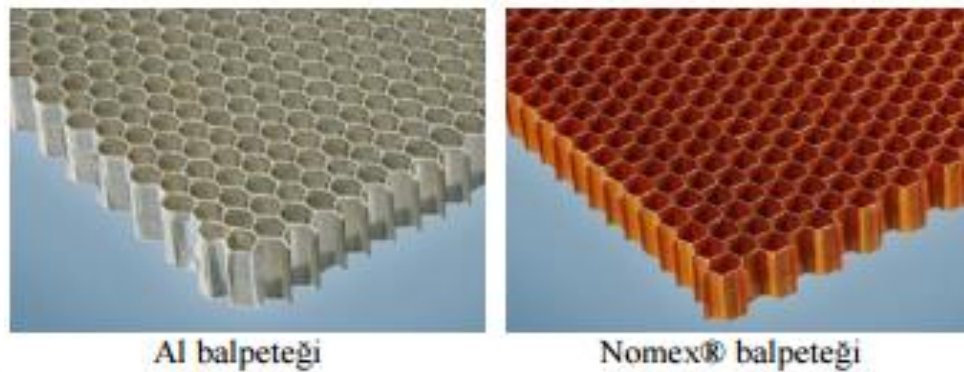
Uçak sanayisinde kullanılan en önemli malzeme gruplarından bir tanesi de balpeteği kompozit yapılarıdır. Balpeteği kompozit yapılarının en önemli özellikleri dayanım ve ağırlıktır. Bu tür malzemelerin dayanım/ağırlık oranları diğer metalik malzemelere göre oldukça fazla olmasından dolayı havacılık ve savunma sanayi başta olmak üzere birçok alanda yoğunlukla tercih edilmektedir. Şekil 1.1’ de balpeteği kompozit paneli ve I kirişi görülmektedir.



Şekil 1.1. Balpeteği kompozit paneli ve I kirişi [1]

Balpeteği kompozit panellerin yapımında birçok malzemeden yararlanılmaktadır. Burada dikkat edilen en önemli malzeme özellikleri dayanım ve hafifliktir. Bundan dolayı en fazla kullanılan malzemeler düşük yoğunluklu Alüminyum, Nomex, Kevlar ve Polipropilen olarak sayılabilir [2]. Bu malzemelerden Polipropilen düşük ergime sıcaklıklarından dolayı daha çok denizcilik sektöründe kullanılırken, Alüminyum, Nomex ve Kevlar gibi malzemelerden üretilen balpeteği yapıları dayanım, hafiflik ve

korozyon direnci açısından çeşitli üstünlüklere sahip olduğundan havacılık sektöründe yaygın olarak tercih edilmektedir. Şekil 1.2’ de farklı malzemelerden üretilmiş balpeteği yapıları görülmektedir.



Şekil 1.2. Malzeme türlerine göre balpeteği yapıları [3]

Uçaklarda kullanılan balpeteği kompozit yapılarının en önemli sorunlarından bir tanesi kullanım sırasında panel içerisinde hapsolan sudur. Panel içerisinde biriken su zamanla malzemenin kimyasal hasara uğramasına neden olabilir. Bu nedenle su miktarının kontrol edilmesi ve giderilmesi gerekmektedir. Bu konuda en etkili yöntemlerden bir tanesi bir tür hasarsız muayene yöntemi olan termografi yöntemidir. Termogafi muayene yöntemi bir termal kamera yardımı ile yapılır ve balpeteği yapılarda su/buz tespiti ile yapışma bölgelerinin hasar durumunu kontrol amacıyla kullanılabilir. Bu yöntem özellikle uçak hareket organlarındaki kompozit yapılarda birikmesi muhtemel su ve nemin tespitinde kullanılabilir.

Bu çalışmada, uçaklarda kullanılan balpeteği kompozit yapıların içerisine hapsolan su ve nemin tespiti termografi yöntemi ile yapılacaktır ve elde edilen sonuçlar analiz edilerek, tamir yöntemleri ve kompozit yapıların hasara uğramasının önüne geçmek için öneriler sunulmaya çalışılacaktır.

## 2. BÖLÜM

### TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ

#### 2.1. Tahribatsız Muayene Yöntemleri Genel Bilgiler

Tahribatsız muayene uygulamaları malzemenin içyapısı, geometrisi, imalat sırasında meydana gelen süreksizlikler veya yapısal bozukluklar hakkında bilgi sahibi olmak amacı ile malzemeye fiziksel ve görevsel bakımdan hiçbir hasar vermeden yapılan incelemelerdir. Uçak yapılarına, bakım sırasında uygulanan tahribatsız muayene yöntemleri sayesinde uçağın birçok erişilemeyen ve gözlemlenemeyen bölgelerinde herhangi bir yapısal hasarın olup olmadığı rahatlıkla görülebilir. Hasarsız kontrol yöntemlerinin doğru uygulanmasıyla birlikte hem güvenilirlik hem de ekonomik olarak yarar sağlamaktadır [7]. Havacılık sektöründe en fazla tercih edilen tahribatsız muayene uygulamaları aşağıdaki gibidir [11]:

- Görsel inceleme
- Radyografik muayene
- Termografik muayene
- Girdap akımları yöntemi
- Penetrant yöntemi
- Manyetik parça ile kontrol
- Ultrasonik muayene

Gelişmekte olan hava aracı tasarımının yanı sıra bakım faaliyetlerinin de bu gelişmeye uygun olarak ilerlemesi sağlanmalıdır. Bu yüzden havacılık bakım sektöründe sıkça kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinin gelişimi sıklıkla takip edilmesi ve

uygulamasının gerçekleştirilmesi gerekmektedir [7]. Tablo 2.1’ de tahribatsız muayene yöntemleri ile hasar tespit edilirken bu yöntemlerin uygulanabileceği süreksizlikler arasındaki bağlantı verilmiştir.

Tablo 2.1. Tahribatsız muayene yöntemleri ile süreksizlik arasındaki bağlantı [8]

| <b>Tahribatsız Muayene Yöntemi</b> | <b>Süreksizlikler</b>                |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| Gözle muayene                      | Yüzey ve yüzeye yakın süreksizlikler |
| Sıvı penetrant ile kontrol         | Yüzey ve yüzeye yakın süreksizlikler |
| Manyetik parça ile kontrol         | Yüzey ve yüzeye yakın süreksizlikler |
| Radyografi ile kontrol             | Malzeme içindeki süreksizlikler      |
| Ultrasonik kontrol                 | Malzeme içindeki süreksizlikler      |
| Eddy akımları ile kontrol          | Yüzey ve yüzeye yakın süreksizlikler |
| Termografik kontrol                | Malzeme içindeki süreksizlikler      |
| Tap test                           | Yüzey ve yüzeye yakın süreksizlikler |

Hasarsız kontrol yöntemleri yüzeysel ve hacimsel uygulamalar olarak iki grup altında toplanabilir. Bu teknik grupların her birisi endüstriyel olarak çeşitli yerlerde uygulanabilir. Yüzey için olan uygulamalar, cismin yüzeyinde ve hemen yüzeyin alt kısmında meydana gelen süreksizliklerin belirlenmesinde kullanılır. Bu yöntemler; sıvı penetrant yöntemi, manyetik parçacık yöntemi ve gözle muayene yöntemi olarak sayılabilir. Hacim için olan uygulamalarda ise ultrasonik kontrol, termografik kontrol ve radyografi uygulamaları örnek olarak belirtilebilir [10].

### 2.1.1. Görsel Muayene

Görsel inceleme, oldukça sıradan tahribatsız muayene yöntemi olarak görülmesine rağmen kendisine ait incelikleri mevcuttur. Çoğu zaman diğer tahribatsız inceleme yöntemlerinin uygulanmasından önce ihtiyaç duyulan bir incelemedir. Görsel muayene çıplak göz ile uygulanan bir inceleme yöntemi olup bir numunenin yüzeyindeki büyük boyutlu süreksizliklerin tespitinde optik bir yardımcı (büyüteç gibi) kullanarak veya kullanmaksızın muayene edilmesidir. Görsel inceleme, diğer yöntemler ile mukayese edildiğinde en kolay ve en ekonomik olan yöntemdir. Bu nedenlerden dolayı uçak bakımında en fazla ihtiyaç duyulan ve seçilen inceleme yöntemidir. Görsel muayenedeki en önemli unsurlardan biri de inceleme yapılacak bölgenin temiz olmasıdır [4]. Uçak yüzeyinde meydana gelen süreksizliklerin ortaya çıkartılmasında gözle muayene yöntemi etkilidir. Uçağın her inişi sonrasında uçağa görsel muayene yapılır. İncelemeyi yapan kişi ile uçak arasındaki uzaklık fazla olduğundan dolayı bu yöntem ile yalnızca makro düzeydeki bozukluklar gözlemlenebilir [8]. Rutin bir görsel inceleme sonucunda Şekil 2.1’ de görüldüğü üzere uçak lastiğinin hasarlı olduğu gözle muayene sonucu tespit edilmiştir.



Şekil 2.1. Uçak lastiğinin oluşunda meydana gelen hasarın gözle muayenesi

### 2.1.2. Ultrasonik Muayene

Ultrasonik incelemede numuneye frekansı yüksek dalgalar yollanarak cismin içindeki süreksizliklerin belirlendiği hasarsız bir inceleme yöntemidir. Ultrasonik muayenenin temelinde, ses dalgalarının katı cisimlerin içerisinde geçirilmesiyle faydalanılır. Bu

nedenle dalgalar sadece yüzeyden yansımazlar aynı zamanda iç bölgeler tarafından da yansıtılmaktadır. Cisim ve ses dalgasının etkileşimi daha kuvvetli olur.

$$\lambda = c/f \quad (2.1)$$

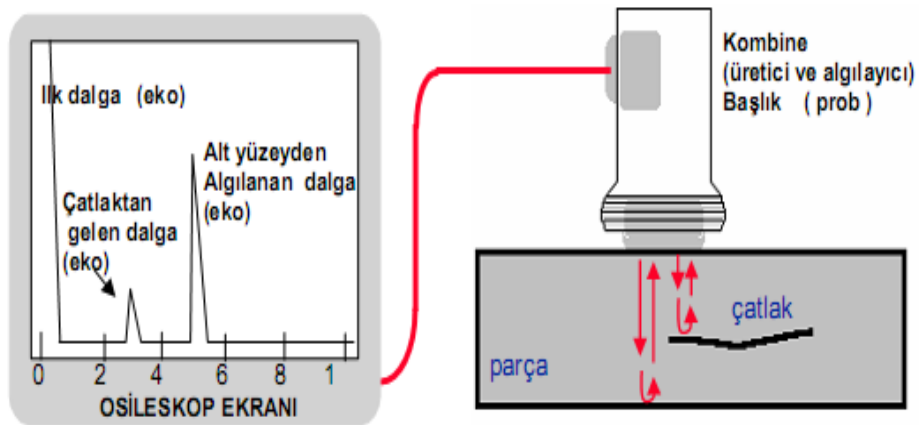
c: Ses hızı (km/sn)

f: Frekans (MHz)

$\lambda$  : Dalga boyu (mm)

Bu eşitliğe göre dalga boyu büyüdükçe dalga frekansı düşer. Ultrasonik dalgaların frekansı 0,5 MHz ile 25 MHz arasında kullanılmaktadır. Daha düşük frekanslarda malzeme içerisindeki süreksizliğin tespit edilmesi zorlaşır. Çünkü malzemenin iç hataları ile ses dalgalarının etkileşimi azalır.

Günümüzde birçok inceleme yapılacak yerde ultrasonik incelemenin tercih edilmesinin sebebi daha kolay olması ve riski olmamasıdır. Ultrasonik muayeneyi yapacak kişi için önemli olan “prob”dur (dalga üretici ve algılayıcı başlık). Çok küçük elektrik vurutularla uyarılması yapılan piezoelektrik element ultrasonik vurutuyu iletir. Bu durum bir salınım yapmaya neden olur. Prob, inceleme yapılacak cismin yüzeyine bir sıvı ile bağlıdır. Böylelikle prob tarafından inceleme yapılacak cismin iç bölgesine ses dalgaları iletilebilir [5]. Şekil 2.2’ de ultrasonik muayenede osiloskop ekran görüntüsü şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.2. Ultrasonik muayenede osiloskop ekran görüntüsü [6]

Ultrasonik muayenenin avantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir [9]:

- Hassasiyeti çok fazladır.
- Tek yüzey ile yaptığımız işlem yeterli olmaktadır.
- Uzunluğu ve kalınlığı 10 metreden büyük olan malzemeler test edilebilir.

Ultrasonik muayenenin dezavantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

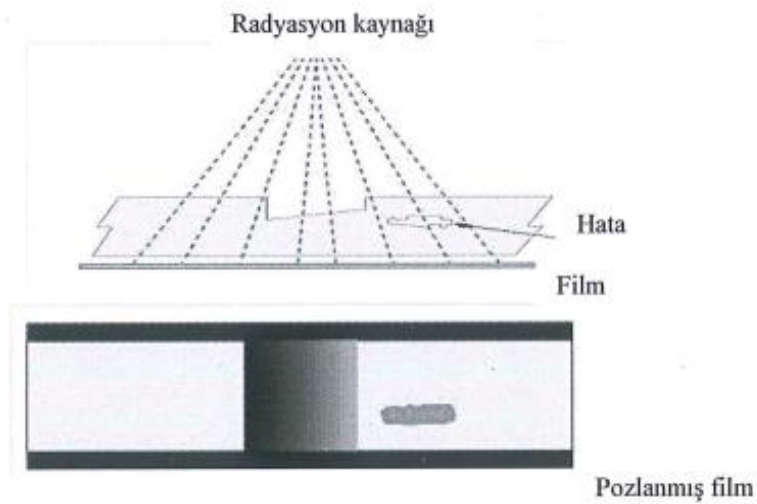
- Oldukça maliyetli bir tahribatsız muayene yöntemidir.
- İncelemesi yapılacak malzemenin geometrisi düzgün değilse yapılan inceleme sağlıklı olmaz.
- Sürekli kalibrasyon yapmak gereklidir.
- 25 mm den küçük malzemeler için kullanışlı değildir.

### 2.1.3. Radyografik Muayene

Radyografi, radyasyonun numune içerisinden geçip bir film veya ekranın üzerinde iki boyutlu görüntünün oluşturulmasına dayanır. Oluşan görüntünün değerlendirilmesine ise radyografik muayene denilir. Endüstride büyük bir öneme sahip, malzeme içerisindeki süreksizlikleri tespit edebilen bir hasarsız kontrol yöntemidir. Radyografik yöntem ve girici radyasyon olarak değişik radyasyon türleri kullanılmasıyla parçanın içyapısında meydana gelen hatalar gözlemlenebilmektedir. Bu muayene yöntemi endüstri amaçlı kullanılırken, yoğunluğu yüksek malzemelerin incelenmesini gerektirdiğinden dolayı nüfuz etme ve emilme özellikleri yüksek olan elektromanyetik radyasyon kullanılır. Bu sebeple X ve Gamma ışınları tercih edilmektedir. Teknolojinin gelişmesiyle beraber radyografik muayenede ilerleme göstermiştir. Filmlili radyografik incelemeden ziyade dinamik inceleme yapılabilmesini sağlayan dijital radyografik yöntemler uygulanmaya başlanmıştır. Klasik ve dijital radyografik muayenenin ana çalışma mantığı aynıdır. Sadece iki boyutlu görüntünün oluştuğu yer bakımından farklılıklar gösterirler. Klasik radyografik incelemede görüntü filme veya bir ekranın üzerine aktarılır. Dijital radyografik incelemede ise görüntü fosfor plakalar üzerine gönderilir. Dijital radyografik incelemenin en önemli avantajı daha hızlı, ayrıntılı ve

etkin bir değerlendirme yapılabilmesidir. Aynı zamanda elde edilen verilerin dijital alanda olması nedeniyle verilerin saklanması ve erişilmesi oldukça kolaydır [12].

Kompozit malzemeler için radyografik inceleme ise ilk olarak bal peteği yapısının içerisinde suyun belirlenmesinde kullanılır. Radyografik görüntüde suyun olduğu bölgeler koyu renkle görünürler. Malzeme üretim aşamasında yapılan kür işlemi süresince az da olsa reçine petekli yapı içerisinde kalmış olabilir. Böyle bir durum ortaya çıktığında balpetekli yapı içerisindeki görünüm, su birikmesi sonucu oluşan görüntü ile aynıdır. İki durum arasındaki farkı etkin bir biçimde belirleyebilmek için X ışınlarını hücrenin duvarına paralel doğrultuda gönderilmesi gereklidir. Buna ek olarak radyografi yöntemi ile petekli yapının yüzeyindeki tabaka çatlakları da belirlenebilir [13]. Şekil 2.3’ te radyografik muayene sonucu hatanın film üzerine bıraktığı iz görülmektedir.



Şekil 2.3. Radyografi uygulaması ile süreksizlik tespiti [9]

Radyografik muayenenin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir [7]:

- Elde edilen veriler bir film üzerinde ya da ekranda görüntülenmektedir.
- İnce olan malzemeler için etkindir.
- Tüm parçalar üzerinde uygulanabilirliği vardır.

- Hassasiyet bilgisi her filmin üzerinde belirtilmektedir.
- Kalıcı kayıt imkânı sağlar.
- Malzemenin içini hacimsel olarak inceleme imkânı sağlar.

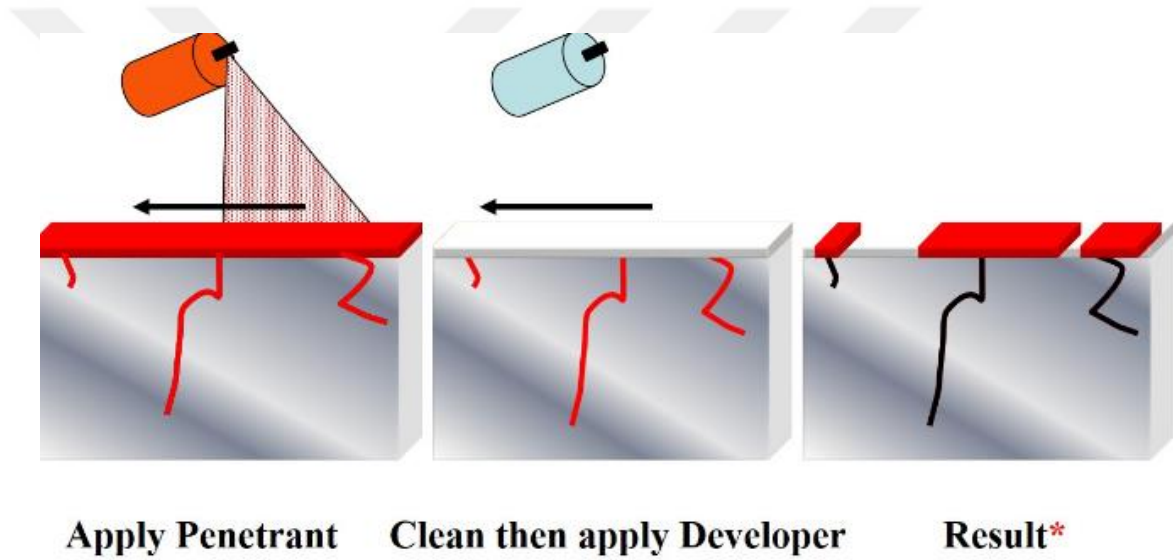
Radyografik muayenenin dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- İncelenecek malzemenin kalınlığı, kullanılacak ışınım kaynağının cinsine bağlı olarak belli değerleri aşamayabilirler.
- Gerekli önlemler alınmasa insan sağlığına zarar verebilir.
- Otomasyon için etkin değildir.
- Yüzeydeki süreksizlikleri bulmak için etkin değildir.
- Yüzeyin altındaki hataların derinliği ile ilgili sonuç alınamaz.

#### **2.1.4. Sıvı Penetrant Yöntemi**

Bu tahribatsız muayene türü malzemenin yüzeyinde olan hataları ya da yüzeye yakın bölgelerde meydana gelen hataların belirlenmesinde etkin bir yöntemdir. Uygulaması oldukça kolay ve yaygın bir tahribatsız muayene yöntemidir. Bu uygulama türünde kullanılan penetrant malzemesi küçük gerilim ile büyük kılcal yapıya sahiptirler. Penetrant testi yapılacak olan numunenin yüzeyini temizlemek birincil olarak yapılması gereken işlem adıdır. Çünkü çatlakların arasına herhangi bir kir girmiş ise çatlaklar etkin bir şekilde belirlenemeyebilir. Penetrant, testi yapılacak olan malzemenin yüzeyine uygulanır. Penetrant uygulandıktan sonra çatlaklara olumlu bir şekilde emilimi için yaklaşık olarak on beş dakika beklenir. Bir sonraki adımda hataların içine nüfus etmeyen penetrant kalıntıları silinir. Hataların içerisine sızan penetrant sıvısının daha belirgin hale gelebilmesi için ince bir kat malzemenin yüzeyine geliştirici uygulanır. Geliştirici uygulandıktan sonra morötesi ışık altında incelenir. Çatlaklar arasına sızan penetrant sayesinde morötesi ışıktaki çatlaklar rahatlıkla tespit edilir. Penetrant sıvısının uygulandığı malzemenin yüzey inceleme işlemi bittikten sonra malzeme yüzeyinde kalan penetrant ve geliştirici temizlenir. Bu yöntemin uygulanması kolay olup tüm metalik malzemelere, plastik, seramik, mika ve cam gibi cisimlerin yüzeylerindeki

süreksizlikleri tespit etme imkânı sağlar. Otomasyon için verimli ve nicel olması gibi avantajlara da sahiptir. Yüzey ve yüzeye çok yakın bölgelerde iyi sonuç veren bir uygulamadır. Penetrant yönteminin dezavantajı ise malzemenin içyapısında ki süreksizlikler hakkında herhangi bir bilgi vermiyor olmasıdır. Çok fazla pürüze ve gözeneğe sahip yüzeylerin incelemesinde de etkin değildir. Penetrant yöntemini uygulamadan önce ve uygulandıktan sonra temizleme işlemi yapılması gerekir. Bu yöntem uygulanırken penetrant sıvısının emilimi için belli bir bekleme süresine ihtiyaç duyulur [14]. Şekil 2.4' de penetrant yönteminin temel adımları verilmiştir.



Şekil 2.4. Penetrant yönteminin temel adımları [15]

#### 2.1.5. Manyetik Parça ile Kontrol

Bu hasarsız kontrol yönteminde manyetizmadan yararlanılmaktadır. Yani inceleme yapılacak malzeme veya inceleme yapılacak alanda manyetik alan oluşturulur. Manyetik parçacık kontrolünde malzemenin yüzeyi ile yüzeye yakın bölgelerdeki süreksizlikler tespit edilebilir. İnceleme yapılacak malzemenin ferromanyetik bir malzeme olması gereklidir. Manyetizasyon esnasında manyetik alanının oluşturduğu çizgiler çatlak bölgelere gelince, manyetik iletkenliğin değişmesi nedeniyle manyetik alan sapmaları gözlenir. Manyetik alandaki değişim (sapmalar) bu inceleme yönteminin temelini meydana getirir. Çatlağın varlığı ya da malzeme ayrılmasının meydana getirdiği saçılan alana, manyetizasyon esnasında malzemenin yüzeyine kuru ya da bir

sıvı içerisinde süspansiyon (karışım) halinde demir tozları dökülür. Eğer var ise süreksizliklerin olduğu malzeme yüzeyinde demir tozları toplanır. Böylece hatalı bölgeler rahatlıkla tespit edilebilir [16].

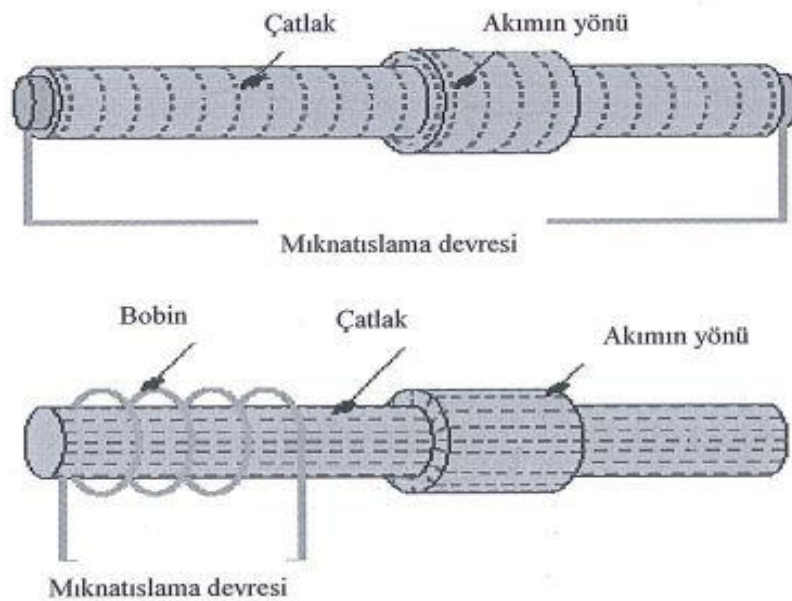
Manyetik parçacık yönteminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir [7]:

- Uygulanması basit ve net bir inceleme yöntemidir.
- Kullanılan test cihazı taşınabilir.
- Uygulaması basit ve ekonomik bir tahribatsız muayene çeşididir.

Manyetik parçacık yönteminin dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Bu inceleme yöntemi yalnızca ferromanyetik malzemelerde etkindir.
- Malzeme üzerinde meydana gelecek manyetik alan çizgilerinin yönlerinin doğru ve etkin olması zorunludur.
- Hata derinliği kesin olarak tahmin edilemeyebilir [7].

Şekil 2.5' te manyetik parçacık yöntemi kullanılarak hasarın tespit edilmesi görülmektedir.



Şekil 2.5. Manyetik parçacık uygulaması ile hasar tespiti [7]

### 2.1.6. Eddy Akımları ile Kontrol

Girdap akımları ile muayene esasında iletken malzemelerin incelenmesinin temeli olarak bilinen elektromanyetizmaya dayanır. Elektromanyetik indüksiyon olarak adlandırılan işlem sayesinde girdap akımları oluşturulur. İçinden akım geçirilen bir iletken malzemenin çevresinde manyetik alan oluşur. Bu manyetik alanın büyüklüğü, kendisini meydana getiren akım ile doğrudan alakalıdır. Şiddeti değişir olan bu akım (örnek olarak zamanla bağlantılı değişebilen bir alternatif akım) bir manyetik alan oluşturur. Ayrıca elektriği iletme özelliği olan bir cisim bu manyetik alan içerisine bırakılırsa, cismin içinde bir gerilim indüklenir. Malzeme iletken hale geldiğinde bu gerilim malzeme içinde akım indüklemiş olur. Bu akım “Eddy Akımı” (Girdap Akımı) olarak isimlendirilir. Girdap akımları kendisini meydana getiren akımın özelliklerini barındırır ancak doğrultusu ters oluşur. Cismin yüzeyinde oluşan girdap akımı direkt olarak kendisini meydana getiren akımın frekans değeri ile ilişkilidir. Bu açıdan girdap akımlarının etkilediği derinlik bu frekans değerinin artması sebebiyle azalma gösterecektir. Malzemenin içerisinde gerçekleşen girdap akımları malzemenin yüzeyinde meydana gelen akımların faz değişimiyle ilişkilidir. Herhangi bir boşluklu yapı, çatlak veya yüzeyde oluşan süreksizlikler olması durumunda girdap akımlarının normal akış doğrultusunda yayılamadıkları bilinir. Sonuç olarak manyetik alanda bir değişim meydana gelir. Bununla ilgili olarak da test bobini de buna bir tepki verir. Eddy akımları çatlakların tespit edilmesinde, malzeme kaplamasının kalınlığının ölçülmesinde, malzeme iletkenliği ölçümlerinde ve ısıdan kaynaklı hasarların tespit edilmesinde kullanılır [18]. Şekil 2.6’ da Girdap akımları muayenesinin yapılabilmesini sağlayan test cihazı görülmektedir.



Şekil 2.6. Girdap akımları muayene yöntemi test cihazı [17]

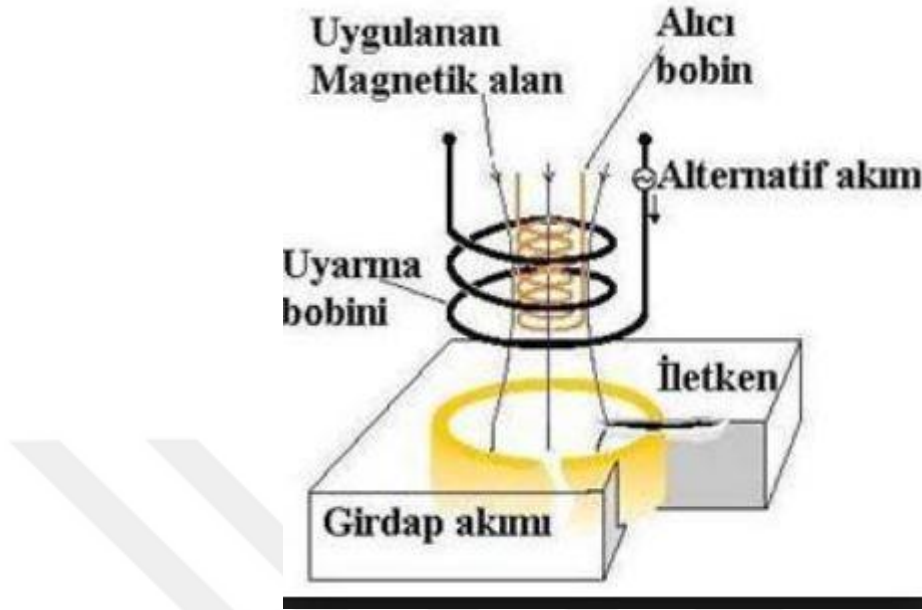
Girdap akımları muayene yönteminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir [9]:

- Yüzeyde bulunan ve yüzeye yakın olan hataların tespitinde kullanılır.
- Manyetik bir malzemenin kaplaması ölçülebilir.
- Kolay taşınabilir bir cihaz ile bu yöntem gerçekleştirilir.
- İnce levhalarda kalınlık ölçülebilir.
- Bir malzemenin boya kalınlığı ölçülebilir.
- Malzeme türünün tespit edilmesinde de etkin bir yöntemdir.

Girdap akımları muayene yöntemlerinin dezavantajları aşağıdaki gibidir:

- Derinlik ölçebilme sınırı 12 mm civarındadır.
- Karbon çeliklerde bu yöntem etkin değildir.
- Girdap akımları yönteminin uygulanabilmesi için inceleme yapılacak malzemenin iletken olması gerekmektedir.
- Manyetik çizgilere paralel olan süreksizliklerde bu yöntem sonuç vermez.

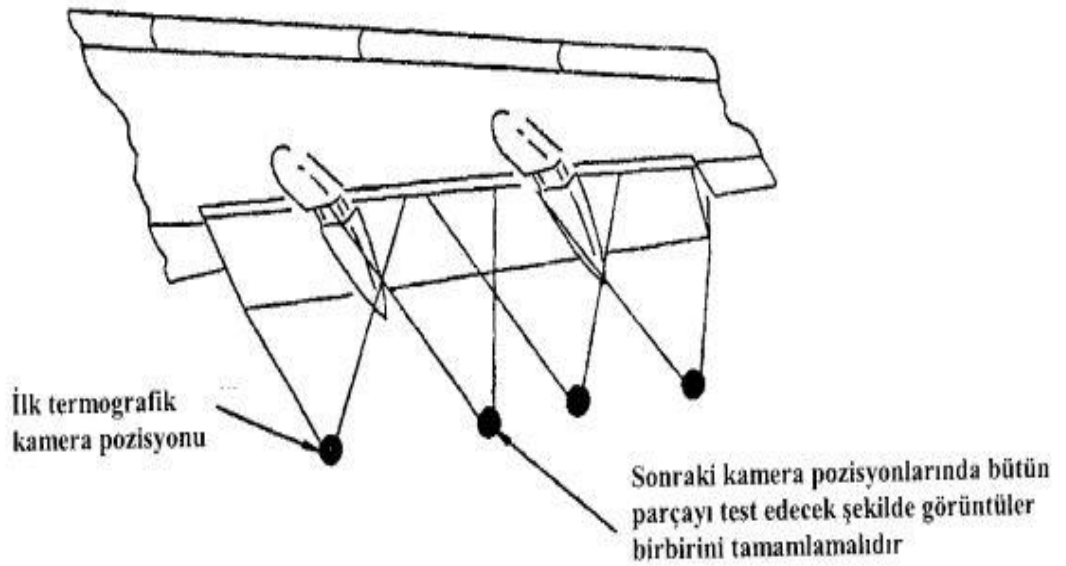
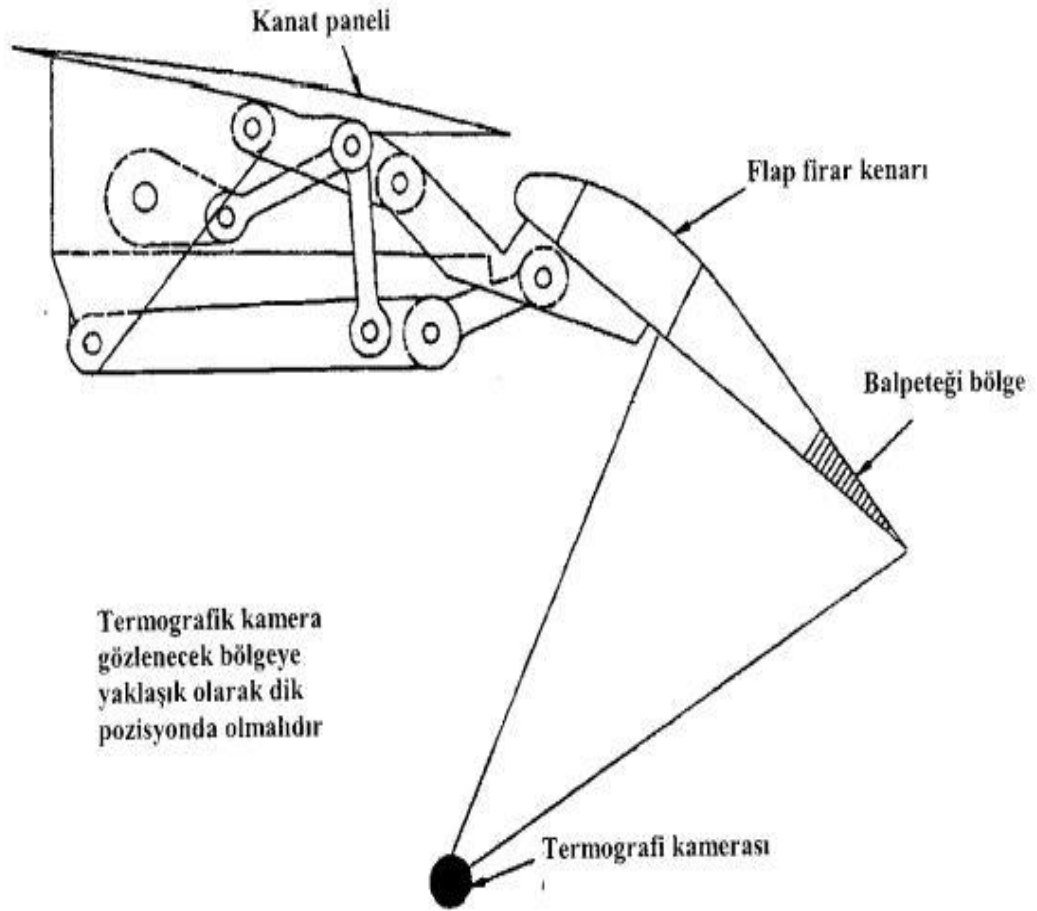
Şekil 2.7’ de girdap akımlarının nasıl oluştuğu görülmektedir.



Şekil 2.7. Girdap akımlarının oluşumu [19]

### 2.1.7 Termografik Muayene

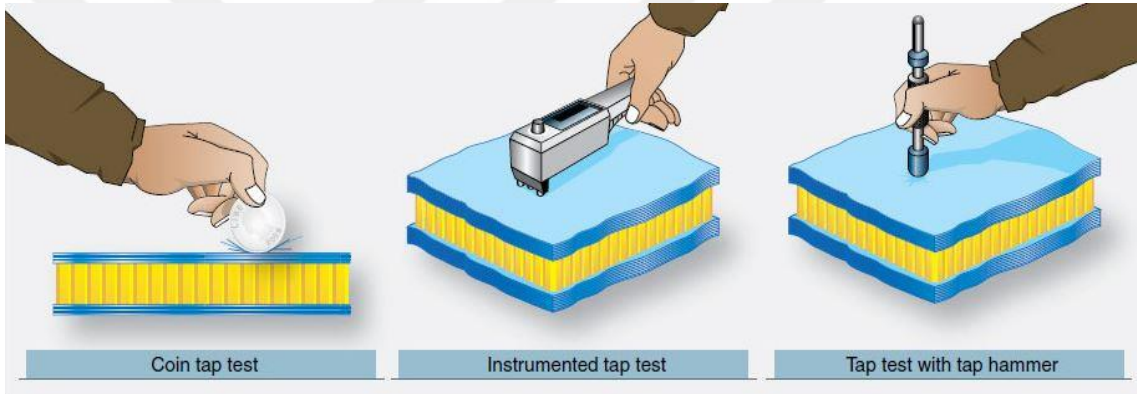
Termografik inceleme balpeteği yapısında meydana gelen su ile buzun tespit edilmesinde ve üretim malzemesi alüminyum olan sandviç yapılar için petek ile tabakalar arasında oluşan yapışmadaki kusurları görüntülemek için kullanılmaktadır. Bu tahribatsız muayene bir termografik kamera ile yapılmaktadır. Termografik kamera kullanımında pozisyon alma, yapılacak incelemenin verimliliği için oldukça önemlidir. Ayrıca test edilecek malzeme ile kamera arasındaki dik konum sürekli olarak muhafaza edilmelidir. Termografik muayenede temel olan yapıdaki ısının farklı olduğu yerleri belirleyip süreksizlikleri bulmaktır [13]. Bu yöntem ile ilgili detaylı bilgi ilerdeki bölümlerde verilecektir. Şekil 2.8’ de uçak üzerinde termografik muayene uygulanırken nasıl pozisyon alınacağı görülmektedir.



Şekil 2.8. Termografik bir muayenede termografik kamera ile doğru pozisyon almanın gösterimi [17]

### 2.1.8. Tap Test

Tap test yöntemi, metal olan disk, tap cihazı veya test çekici kullanılmasıyla gerçekleştirilir. İncelemesi yapılacak olan yere, testin yapılması için ihtiyacımız olan malzemelerden biri vurulur. Tabakalar arası yapışma hatası ve ayrılmanın mevcut olduğu yerlerde sönük bir ses duyulur. Bu inceleme yöntemi, süreksizliğin olduğu alanın genel olarak belirlenmesi yapılması için kullanışlı bir muayene türüdür. Bu yöntem tabaka sayısı fazla olan bir malzeme için etkin değildir. Tabaka sayısı 5 kat ve üzeri ise tap test uygulaması tercih edilmez. Yapılan incelemenin etkin olmasındaki diğer faktörler; tap testi yapan kişinin duyma yetisi, ortamın sessizliği ve testi yapan kişinin tecrübesidir [17]. Tap test çeşitleri Şekil 2.9’ da görülmektedir.



Şekil 2.9. Madeni para, tap test cihazı ve tap test çekicinin uygulama esnasındaki gösterimi [20]

Tap test cihazı batarya ile çalışır. Cihaz süreksizliğin olduğu bölgeyi tespit eden bir göstergesi mevcuttur. Madeni para ve test çekici ile yapılan incelemeye göre tap test cihazı ile yapılan incelemede oldukça hassas sonuçlar elde etmek mümkündür [17].

### 3. BÖLÜM

#### TERMOGRAFINİN TEORİK ALT YAPISI

Kızılötesi ve termal ölçüm teknikleri, yüzey altı hataların tespitinde, termo-fiziksel özelliklerin belirlenmesinde, kaplama kalınlığının ölçülmesinde ve direk olarak gözle görülmeyen gizli hasarların tespit edilmesi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılır [21].

Kızılötesi ışıınımı, elektromanyetik radyasyon grubunun içerisinde kabul edilmektedir. Günümüzde büyük öneme sahip olan kızılötesi ışınları üzerine yapılan çalışmalar devam etmektedir. Max Planck'ın, 14 Aralık 1990 tarihinde radyasyon teorisini duyurmasından çok daha önceleri, sıcaklığın ölçülmesi her zaman ilgileri çeken bir konu olmuştur ve kızılötesi termografi günümüzde en ileri sıcaklık ölçme tekniklerinden birisi olmuştur [22]. Kısacası termografi, kızılötesi ile görüntü alma uygulaması olarak ifade edilebilir. Çeşitli alanlarda çeşitli uygulamalar için termografi yönteminden yararlanılabilmektedir. Temasa ihtiyaç duymadan ölçme işlemi gerçekleştirilebildiği için çokça tercih edilir. Termografinin ana prensibi; malzeme içindeki süreksizlik nedeni ile malzemenin ısı akımındaki değişikliğe dayanır. Isı akımında oluşan değişiklik, malzeme yüzeyinde bölgesel ısı değişimi meydana gelir. Bu sayede malzeme yüzeyinde termal şekiller oluşmaktadır. Bu termal şekillerin görülebilir formata getirilmesi termografiyi meydana getirir [23].

Başka bir deyişle, malzemedен yansımakta olan ve insan gözü ile görülemeyen kızılötesi enerjisinden oluşan verilerin görülebilir hale getirilmesi termal görüntüleme teknolojisi ile mümkündür. Mutlak sıfır ( $-273^{\circ}\text{C}$ ) üstü bir sıcaklık değerine sahip bütün maddeler kızılötesi ışıma yaparlar. Bu ışımanın gerçekleşmesinin nedeni, atom ve molekül yapılarının mutlak sıfır noktası üzerindeki ısılarda titreşim ve dönme eylemlerini yapmasıdır. Atom ve molekül yapıları dönme eylemini gerçekleştirirken

açığa kızılötesi enerjisi çıkar. Isı değeri ne kadar yüksek ise yayılan kızılötesi enerjide o kadar yüksek olur. Bir termal görüntüdeki cisimlerin çeşitli ısı değerleri çeşitli renkler ile gösterilir. Termal görüntüleyici cihazlar, insan gözü tarafından görülemeyen aralıktaki radyasyonu görebilmemizi sağladığı için günümüzde pek çok alanda gözlemlene ve inceleme işleri için tercih edilmektedir [24]. Şekil 3.1’ de çalışır durumdaki bir dizüstü bilgisayarın termografik kamera ile incelenmesi sonucunda oluşan termal görüntü görülmektedir.



Şekil 3.1. Bir dizüstü bilgisayarın çalışma esnasındaki termal görüntüsü [25]

Yukarıda verilen termal görüntüde kırmızı bölgelerin daha sıcak olduğu mavi bölgelerin ise daha soğuk olduğu anlaşılmaktadır. Şekilde ortalama 19,2°C ile 34,9°C arasında sıcaklık değerleri gözlemlenmektedir.

### 3.1. Elektromanyetik Tayf

Elektromanyetik tayf Şekil 3.2’ de görüldüğü üzere radyo dalgalarından, mikrodalgalarından, kızılötesi, görünür bölge, morötesi, x ışınları ve gama ışınlarından oluşmaktadır. Aynı zamanda bunlar birer radyasyon tipidir. Radyasyon tiplerinin arasındaki en önemli farklılıklar dalga boyları ve frekanslarıdır. Radyo dalgalarından gama ışınlarına doğru gidildikçe dalga boyu azalırken frekans artmaktadır. Bu radyasyon çeşitlerinin tamamı elektromanyetik dalgalar ve ışık hızı ile hareket ederler. Dalga boyu ile frekans arasında aşağıda gösterildiği gibi bir bağlantı vardır [10].

$$c = f \cdot \lambda \quad (3.1)$$

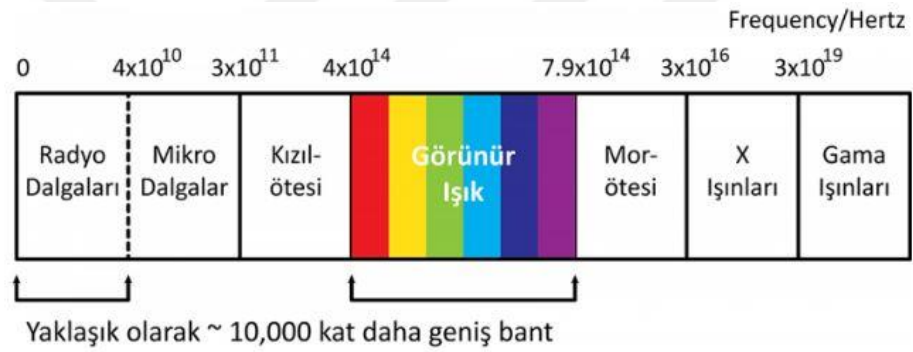
c: Işık hızı ( $3 \cdot 10^8$  m/sn)

f: Frekans (Hz)

$\lambda$ : Dalga boyu (metre)

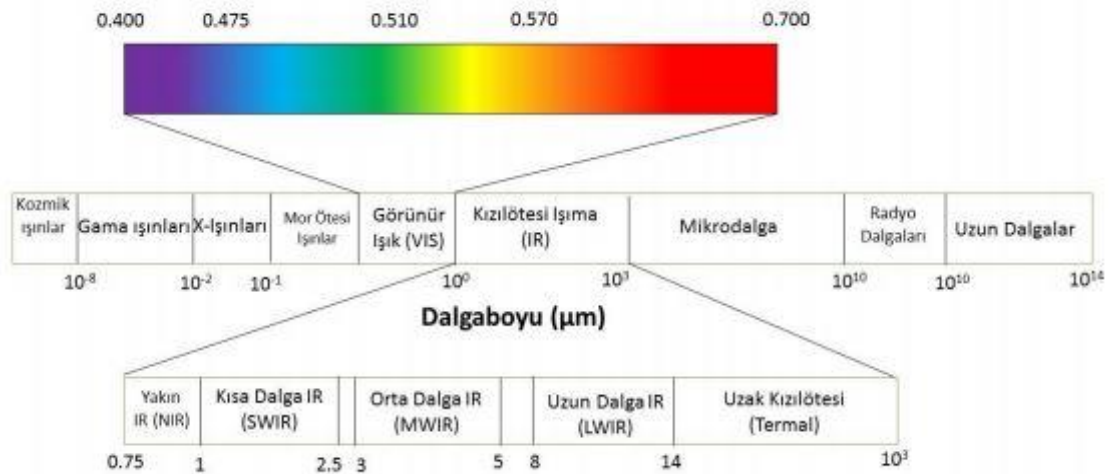
Işık hızı sabit sayı olduğundan dolayı doğrudan frekans ile dalga boyu birbiriyle ters orantılıdır denilebilir.

Şekil 3.2' de elektromanyetik tayfta bulunan bölgeler ve bu bölgelerin frekans değerleri görülmektedir.



Şekil 3.2. Elektromanyetik tayf frekans türünden gösterimi [26]

Şekil 3.3' te elektromanyetik tayfta bulunan bölgeler ve bu bölgelerin dalga boyu değerleri görülmektedir.



Şekil 3.3. Elektromanyetik tayfın dalga türünden gösterimi [27]

Tablo 3.1’ de elektromanyetik tayfta yer alan bölgelerin dalga boyu uzunlukları, frekans değerleri, kuantum enerji miktarları görülmektedir.

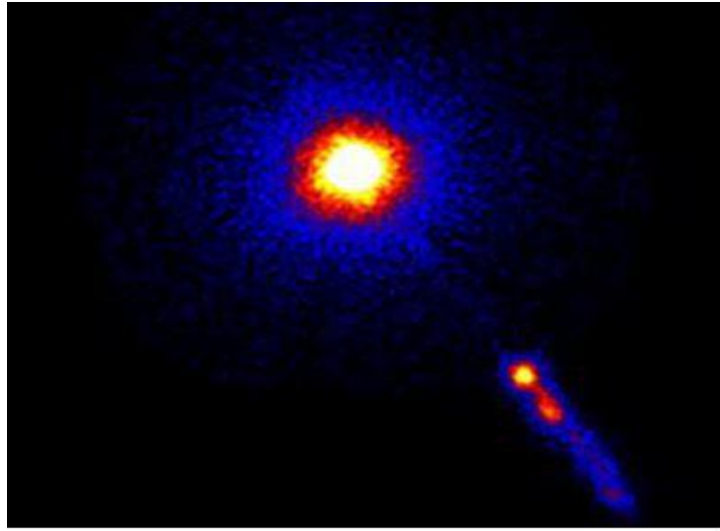
Tablo 3.1. Elektromanyetik tayf [10]

| <b>Radyasyon Tipleri</b> | <b>Dalga Uzunluğu</b>    | <b>Frekans</b>                               | <b>Kuantum Enerjisi</b>                     |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Radyo Dalgalar           | 100km-300mm              | $3 \times 10^3 - 10^9$ Hz                    | $1,2 \times 10^{-11} - 4 \times 10^{-6}$ eV |
| Mikrodalgalar            | 300mm-0.3mm              | $10^9 - 10^{12}$ Hz                          | $4 \times 10^{-6} - 4 \times 10^{-3}$ eV    |
| Kızılötesi               | 0.3mm-0.7 $\mu$ m        | $10^{12} - 4,3 \times 10^{14}$ Hz            | $4 \times 10^{-3} - 1,8$ eV                 |
| Görünür Bölge            | 0.7 $\mu$ m-0.4 $\mu$ m  | $4,3 \times 10^{14} - 7,5 \times 10^{14}$ Hz | 1,8 – 3,1 eV                                |
| Morötesi                 | 0.4 $\mu$ m-0.03 $\mu$ m | $7,5 \times 10^{14} - 10^{16}$ Hz            | 3,1 – 40 eV                                 |
| X-Işınları               | 0.03 $\mu$ m-0.1nm       | $10^{16} - 3 \times 10^{18}$ Hz              | 40 – $1,2 \times 10^4$ eV                   |
| Gama Işınları            | 0.1nm-1pm                | $3 \times 10^{18} - 3 \times 10^{20}$ Hz     | $1,2 \times 10^4 - 1,2 \times 10^6$ eV      |

### 3.1.1 Radyo Dalgaları

Elektromanyetik tayfta radyo dalgaları, diğer radyasyon tiplerine göre en büyük dalga boyuna ve en küçük frekans aralığına sahiptir. 1800’lerin son döneminde Heinrich Hertz, indüksiyon bobini içerisinde üretilmiş olan dalgaların uzakta bulunan anten sayesinde radyo dalgalarının oluştuğunu gözlemlemiştir [27].

Radyo teleskoplarıyla kuasarları (yıldızsı radyo kaynakları-dev nebulalar, öncül yıldızlar ve merkezde bunlar ile beslenmekte olan süper dev kara delikten meydana gelen galaktik sistemler) görebiliriz [27]. Bu oldukça uzakta bulunan nesnelerin görünür bölgedeki ışığı, diğer gök cisimlerinin bizim gezegenimizin önüne geçmesinden dolayı görüntüleyemeyiz. Fakat radyo teleskoplarıyla gözlemlendiğinde görülürler. Radyo teleskopları sayesinde kuasar Şekil 3.4’ te görülmektedir.



Şekil 3.4. 3C 273 Kuasar'ın radyo teleskopuyla görüntülenmesi [28]

Şehir şebekelerinden elde edilen elektriğin geçmiş olduğu tüm kablolar aslında birer radyo dalga kaynaklarıdır. Bu aşağıdaki denklemden daha iyi anlaşılır [27]:

$$\lambda(\text{dalga boyu}) = \frac{C (\text{ışık hızı})}{50\text{Hz}(\text{şehir şebekesi frekansı})} \quad (3.2)$$

Işık hızında ilerlemekte olan elektromanyetik dalgalar için, şehir şebekesinde olduğu şekilde 50-60 Hz aralığında standart frekans değerlerinde dalga boyları hesabı yapıldığında, 5000-6000 km aralığında dalga boyları olarak hesaplanır. Bu da elektromanyetik tayfta radyo dalgaları aralığına denk gelir [27].

### 3.1.2. Mikrodalgalar

Mikrodalga bölümü yaklaşık olarak 1-300 GHz frekans aralığındadır. Bu frekans aralığına karşın dalga boyu yaklaşık olarak 1 mm ile 300 mm arasındadır [11]. Bu dalgalar uzay aracı haberleşmelerinde ve radyo astronomisinde tercih edilir. Özellikle uzayın neredeyse her yerine yayılmış olan nötr hidrojen atomları 21cm'lik (1420 MHz) mikrodalgalar yayarlar. Galaksiler hakkında çok fazla bilgiler, mikrodalga yayını sayesinde edinilir. Şimdilerde mikro dalgalar, telefon ile konuşmaların iletiminde, televizyon istasyon bağlantılarında, uçaklara yol göstermede, karayolunda hızlı sürücülerin tespit edilmesinde, evrenin kökeninin araştırılmasında, garajların kapılarını açmada ve gezegenlerin yüzeylerinin görüntülenmesi gibi pek çok alanda tercih edilmektedir [11].

### 3.1.3. Kızılötesi

Elektromanyetik tayfta kızıl ötesi, görünür bölge ile mikrodalga arasında konumlanmaktadır. Yaklaşık olarak dalga uzunluğu 0.3mm-0.7µm ve frekansı 1THz-430THz aralığında olan kızılötesi bölgesini ilk defa ünlü İngiliz astronom John Herschel tarafından 1800’de bulunmuştur [11]. Kızılötesi ışıma tipinin asıl kaynağı ısıdır. Bir cismin kızılötesi ışıma yapabilmesi için sıcaklığı, mutlak sıcaklığın üzerinde olması gerekir. Yani bir malzemenin sıcaklık değeri -273°C’nin üzerindeyse miktarı değişken olmakla birlikte mutlaka ışıma yapar.

### 3.1.4. Görünür Işın

Görünür bölgedeki dalga boyu yaklaşık olarak 0.4 µm ile 0.7 µm arasındadır. Renk, ışığın kendisine ait bir özellik değildir. Aslında renk, gözler, sinirlerin tümü ve beyinden meydana gelen elektrokimyasal duyu sistemimizin birer algısı olarak kabul edilir [11]. Daha anlaşılır bir şekilde söylenecek olursa “kırmızı ışık” diye söylenmesinin yerine “kırmızı görünen ışık” denilmesi daha uygundur. Farklı frekanstaki renkler karıştırıldığında, algılama sistemimiz tarafından aynı renkler olarak algılamamıza sebep olabilir. Örnek olarak kırmızı ve yeşil ışık demetleri üst üste binince gözümüz sarı ışık olarak algılar. Renkli televizyonlarda, yalnızca üç fosfor (mavi, yeşil ve kırmızı) ihtiyaç duyulur. Çünkü bu üç renk karışımından diğer renkler elde edilebilir. Tablo 3.2’de bazı renklerin dalga boyları ve frekans değerleri görülmektedir.

Tablo 3.2. Farklı renkler için takribi boşluktaki dalga boyları ve frekansları [10]

| Renk    | Dalga boyu | Frekans |
|---------|------------|---------|
| Kırmızı | 622-780    | 384-482 |
| Turuncu | 597-622    | 482-503 |
| Sarı    | 577-597    | 520-530 |
| Mor     | 390-455    | 659-769 |
| Mavi    | 455-492    | 610-659 |
| Yeşil   | 492-577    | 520-610 |

### 3.1.5. Morötesi Işın

Morötesi ışınlar, elektromanyetik tayfta görünür bölge ve X ışınları arasında kalmaktadır. Bu ışınların dalga boyu ortalama  $0,4 \mu\text{m}$  ile  $0,03 \mu\text{m}$  aralığındadır. Frekans değeri ise yaklaşık olarak  $3 \times 10^{14}$ - $3 \times 10^{16}$  arasındadır [29].

J. W. Ritter tarafından keşfedildiği bilinmektedir [11]. Bu ışının foton enerjisi  $3,2\text{eV}$  ile  $50\text{eV}$  aralığındadır [11]. Morötesi ışın enerjisinin en önemli özelliklerinden biri de pek çok kimyasal tepkimeleri başlatabilir. Bu özelliğinden dolayı güneşten gelebilecek zararlı olan ultraviyole ışın enerjileri ozon katmanında tepkimeye girerek bu katmanda harcanırlar ve bu sayede bizlere ulaşımı engellenmiş olur. Yaklaşık olarak  $290$  nanometreden (nm) daha küçük dalga boyları için ultraviyole ışını mikropları öldürme özelliğine sahiptir. İnsan sağlığı için de zararlıdır. Bu yüzden insan vücuduna doğrudan temasta bulunmayacak yerlerde kullanılmaktadır. Bu ışın demetleri, gıda sektöründe besinlerin içerisinde bulunan mikropların öldürülmesinde kullanılır [11]. Ayrıca bu ışınlar çürük besinleri tespit etmek için de oldukça sık kullanılır. İnsan sağlığı için zararlı olmasından dolayı haberleşmede pek tercih edilmez.

### 3.1.6. X Işınları

X ışınları 1895 yılında tesadüfen Wilhem Röntgen sayesinde ortaya çıkartılmıştı. Bu ışınların dalga boyları yaklaşık olarak  $0,1\text{nm}$  ile  $30\text{nm}$  arasındadır. Foton enerjileri de yaklaşık olarak  $40\text{eV}$ - $12\text{KeV}$  arasındadır [11]. X ışını kuantumu bire bir tanecik şeklinde, enerji mermileri gibi, cisimlerle etkileşime girecek büyüklüğe sahiptir. X ışını üretebilmenin en kolay yollarından biri, hızı yüksek ve yüke sahip cismin seri bir şekilde yavaşlatılmasıdır [11].

### 3.1.7. Gama Işınları

Gama ışınları elektromanyetik tayfta X ışınlarından sonra yer alır. Işınlar arasında en düşük dalga boyuna sahiptir. Bu ışınların dalga boyları yaklaşık olarak  $0,1\text{nm}$ - $1\text{pm}$  arasındadır. Ayrıca gama ışınları en büyük enerjiye sahiptirler. Bu ışınların enerjileri  $12\text{KeV}$ - $1,2\text{MeV}$  arasındadır. Gama ışınları atomun çekirdeği içerisinde geçiş yapabilen tanecikler sayesinde yayınlanırlar [30].

## 3.2. Kızılötesi Enerjisi

Kızılötesinin kökeni, bu dalga boyunun elektromanyetik tayfta bulunduğu konuma istinaden “kızıldan daha ötede” olandır [35].

Elektromanyetik tayfta, kızılötesi bölümünde bulunan bir dalganın enerjisinin sebebi ısıdır. Tüm cisimler belirli miktarda sıcaklığa sahiptirler. Bu nedenle cisimlerin tamamı dış ortama kızılötesi enerji yaymaktadırlar. Nesnelerde var olan ısı enerjisi, nesnelerin içlerinde oluşan sıcaklığın artış ve azalışından dolayı oluşabilir veya harici bir kaynak sebebiyle de oluşabilir. Sonuç olarak bütün cisimlerin termal enerji yayabilme özelliğinin yanı sıra harici kaynaklar tarafından gönderilen termal enerjiyi soğurabilme özellikleri de bulunmaktadır. Güneş ve çevresindeki cisimlerin arasındaki ilişki, bu durumu en iyi şekilde açıklayan örneklerden bir tanesidir. Çünkü güneş, vasıtasıyla ısınan cisimlerin termal enerjilerini gece vakti süresinde devamlı olarak çevrelerine yansıtırlar. Ortamda yayılmakta olan termal enerjinin toplam miktarı ve dalga boyunun yoğunluğu cismin sıcaklık değerine bağlıdır. Çevremizdeki birçok cisim ve insan vücudu yaklaşık olarak  $30^{\circ}\text{C}$  sıcaklık değerine sahiptir. Bu yüzden birçok cisim ve insanlar devamlı olarak kızılötesi enerji yayarlar. Buna ek olarak cisimlerin sıcaklıkları ile çevreye yaydıkları kızılötesi enerjisi arasında kuvvetli bir bağ vardır. Örnek olarak bir cismin sıcaklık değeri 2 katına çıkarılırsa açığa çıkan kızılötesi enerji 16 kat artış gösterir. Yani sıcaklığın artışı, kızılötesi enerji miktarında çok daha fazla artışa sebep olmaktadır.

Mutlak sıfır noktası üzerindeki sıcaklık değerlerinde olan tüm cisimler kızılötesi ışıma yaparlar. Bunun nedeni atom ve molekül yapılarının mutlak sıfır sıcaklık değeri üzerinde dönü ve titreşim hareketleri yapabilmesidir. Atom ve molekül yapıları dönü hareketini yaptığı zaman kızılötesi enerji açığa çıkarırlar. Kızılötesi radyasyon ve enerji miktarının belirlenmesi için kullanılan dört temel yasa vardır. Bunlar yasalar [11]:

- Kirchhoff yasası,
- Plank yasası,
- Wien yasası,
- Stefan Boltzman yasasıdır.

### 3.2.1 Krishhoff Yasası

Krishhoff, soğurma özelliği iyi olan bir cismin buna ek olarak çok verimli bir kaynak olduğunu da ortaya çıkartmıştır. Buna ek olarak aynı sıcaklığa sahip bütün cisimlerin çevresine verdiği enerjinin ve soğurma katsayısı oranlarının birbirlerine eşit olması gerektiğini ispatlamıştır. Aynı zamanda soğurma katsayısı oranının, iki niceliğe (sıcaklık ve dalga boyu) bağlı olarak değişebileceğini belirlemiştir. Cismin şeklinin bu oranı etkilemediği de ispatlanmıştır [36].

Her cismin kendisine özgü kızılötesi radyasyon spektrumu vardır. Sonsuz sayıda partikülden meydana gelmiş bir madde düşünüldüğü zaman, bu maddenin rezonans frekansı bütün kızılötesi alanını boşluk kalmayacak şekilde kapsıyorsa bu tür bir maddeye “siyah cisim” ismi verilmektedir. Bu tanımlamadan yola çıkarak siyah cisme, ideal kızılötesi ışın yayımlayıcısı da denilebilir. Bu madde kusursuz bir yayımlayıcı ve soğurucudur. [37]. Siyah cismin belirli bir sıcaklığa sahip olması istenir. Çünkü siyah cisim belirli sıcaklığa ısıtıldığı zaman, bütün dalga boyları için elektromanyetik ışıma yapabilme özelliğine sahip olur [38].

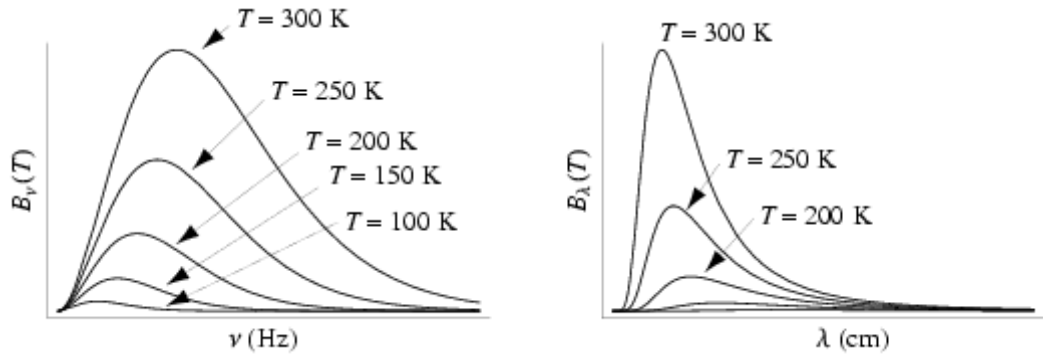
Cismin yayıcılığı (emissivity) bir yüzey özelliğidir. Gösterim şekli “ $\epsilon$ ” dir. Bir malzemenin gerçekleştirdiği yayılmanın, siyah bir malzemenin gerçekleştirdiği yayılmaya bölünmesiyle “emissivity” elde edilir. Siyah cismin emissivity değeri 1 olarak kabul edilir. Siyah cismin bu değeri bir ideal değerdir çünkü gerçek yaşamda cisimlerin hiçbirinin yayıcılığı bir olmamaktadır. Cismin yayıcılığı dalga boyu ve sıcaklık değerinin bir fonksiyonudur. Cismin yayıcılığı sıfır ise süper yansıtıcı olarak isimlendirilir. Cismin yayıcılığı bir ise süper yayıcı ve yutucu (siyah cisim) olarak isimlendirilir [37].

### 3.2.2. Plank Yasası

Bir tahribatsız muayene yöntemi olan kızılötesi termografisi, yayılan elektromanyetik enerjinin ölçümü ile ilgilenir. Belirli sıcaklıkta bir yüzeyden emilen enerji spektral ışıma olarak adlandırılır ve Planck kanunu ile ifade edilir [21].

Plank kanunu, frekans ( $\nu$ ) veya dalga boyu ( $\lambda$ ) ile kara cismin (tüm dalga boylarında gerçekleşen ışınlamaları absorbe etme yeteneğine sahip olan ideal cisim) bir fonksiyonu

olarak Şekil 3.5’ teki grafikte görüldüğü üzere ışıının yoğunluğunu verir. Ayrıca Plank’ın sıcak bir madde ısı kaybederken enerjiyi ışıın olarak ve tamsayının katları olarak kaybettiğini savunmuştur [38]. Bunlara ek olarak Şekil 3.5’ teki grafiklerden yola çıkarak sıcaklık değeri yükseldikçe en fazla yapılan ışıının enerjisi de artmaktadır.



Şekil 3.5. Frekans veya dalga boyu ile kara cismin fonksiyonu [38]

Plank kanunun formülü;

$$E = h \cdot \nu \quad (3.3)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada [39]:

E: Enerji (Joule),

h: Plank sabiti ( $h=6.626 \times 10^{-34}$  J.s),

$\nu$ : frekans (Heartz)’tır [39].

### 3.2.3 Stefan Boltzman Yasası

Tüm malzemeler sıcaklık ve yayılma katsayı değerleriyle ilişkili, farklı dalga boylarında termal enerji açığa çıkartmaktadır. Siyah cisim, üstüne yöneltilen tüm ışımayı emer. Kusursuz yansıtıcı ise üstüne gelen tüm ışımayı yansıtabilen cisim olarak bilinmektedir. Bu anlatılanın matematiksel olarak açıklaması Stefan Boltzman kanunu ile ifade edilmektedir. Alanı “S” olan bir malzemenin yaymış olduğu enerjinin miktarı hesaplanabilmektedir. Bu yasa;

$$W = \sigma \cdot \epsilon \cdot T^4 \quad (Watts/m^{-2}) \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilir. Burada:

$\sigma$ : Stefan Boltzman sabiti ( $5,696 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ),

$\epsilon$ : Cismin yayılma kabiliyeti,

T: Sıcaklık (K)'tır.

Siyah cismin, yayılma kabiliyet katsayısı 1 ( $\epsilon=1$ ) olduğu için; en büyük radyasyon değeri teorik olarak siyah cisim tarafından yayınlanmış olur [11].

#### 3.2.4. Wien Yasası

Sıcaklık değeri arttırılan bir demirin kırmızı ve sarı renklerde ışınlar açığa çıkaracağı gündelik hayatımızdan da bilinmektedir. Bu ışın dalgaları gözle görünür oldukları için fark edilebilirler. Aslında mutlak sıfır sıcaklık değeri üzerindeki bütün maddeler çevrelerine ışınlar saçarlar. Fakat bu ışınların frekansı kızılötesi bölgesinde olduğundan dolayı insan gözüyle görülememektedir. Cismin sıcaklık değeri arttıkça görünür ışın yaymaya başlar. Siyah cisim tüm dalga boylarında ışıma yapabilirler. Fakat bazı frekans aralıklarında daha fazla ışıma yapabilirler. Buradan yola çıkarak cismin sıcaklık değeri ile en büyük enerji değerinde yaydığı ışının frekans değeri arasında bir ilişki vardır. Bu aradaki ilişki Wien yasa ile çözüme kavuşturulur. Bu yasa [40]:

$$\lambda_{max} = \frac{2,898.10^{-3}}{T} \quad (3.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada:

$\lambda_{max}$ : En yüksek dalga boyu ( $\mu\text{m}$ ),

T: Isı verilen cismin sıcaklığı (K)'tır.

#### 3.3. Kızılötesi Termografi Türleri

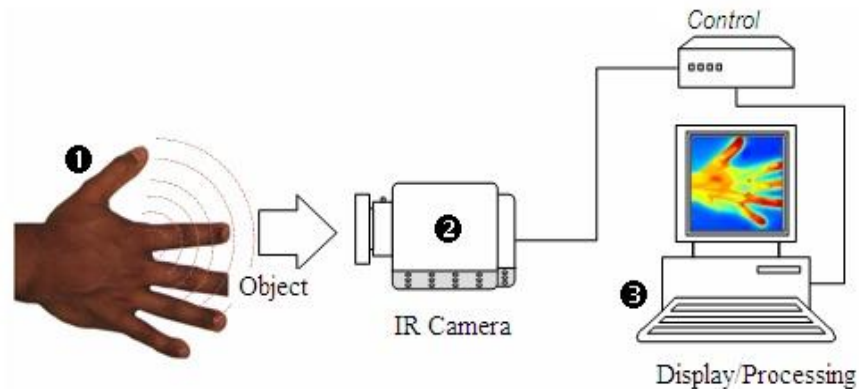
Termal termografi, hasarsız inceleme yönteminde harici sıcaklık arttırıcı kaynak kullanılıp/kullanılmamasına göre sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmada kızılötesi

termografi türleri iki ana başlıkta toplanmaktadır. Uygulamada hasarsız incelemeyi tatbik etmek için dışarıdan bir sıcaklık arttırıcı kaynak kullanılırsa aktif termografi, kullanılmazsa pasif termografi olarak isimlendirilir [37].

### 3.3.1. Pasif Termografi

Termografi inceleme yönteminde, pasif ve aktif olmak üzere iki ana yaklaşım vardır [41]. Pasif yaklaşım genellikle farklı ortam sıcaklığında (bariz olarak daha yüksek) bulunan malzemelerin araştırılmasında kullanılırken, aktif yaklaşımdaysa termal uyarı kaynağı termal zıtlıkları üretme amacıyla kullanılır [42].

Termografinin temel prensipleri aslında termodinamiğe dayanır. Pasif termografi, termodinamiğin ilk kanunu olan enerji korunumu kanununu bünyesinde barındırır ve entropi yasasına bağlı olarak ısının neredeyse tamamının enerji tüketen işlemler vasıtasıyla harcandığı ifade edilir. Bu sebeple ısı, uygun durumların tespit edilebilmesi için ihtiyacımız olan bir ölçüttür. Pasif termografi, uygulama sahası olarak binalarda, bakım işlemlerinde, ilaç endüstrisinde yer bulabilir. Bunlara ek olarak ısı değişimleri doğal çevre ile uyumluysa, çoğu zaman “delta-T” olarak isimlendirilir [43]. Çevreyle olan sıcaklık farkı (delta-T)  $1,2^{\circ}\text{C}$  ise bu şüpheli olarak kabul edilirken,  $4^{\circ}\text{C}$  normal olmayan bir değer olarak kabul edilir. Bu uygulamaların hemen hemen hepsindeki gaye, aksaklıkların basitçe çalışır ya da çalışmaz tespitini yapmak olduğu için pasif termografi oldukça kalitatiftir [43]. Şekil 3.6’ da ele hiçbir harici ısıtma kaynağı kullanmadan olduğu gibi termal kamerada görüntülenmesi görülmektedir.

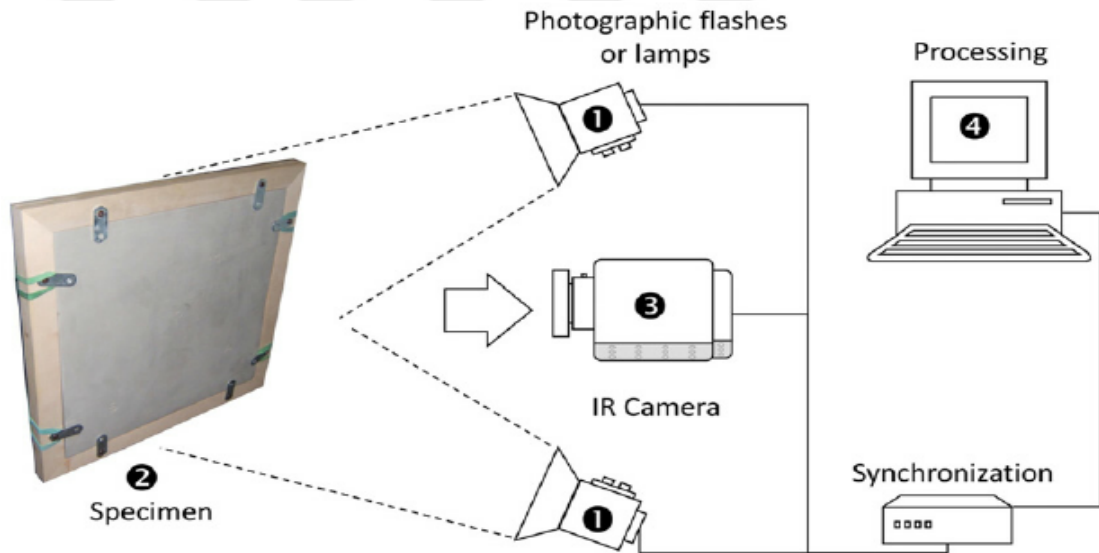


Şekil 3.6. Termografide pasif yaklaşım [44]

Şekil 3,6'daki şemadan anlaşıldığı üzere dışarıdan hiçbir ısı arttırıcı kaynak kullanılmaksızın, el doğrudan termografik kamera ile incelenmiş ve termal görüntü görüntülenmiştir.

### 3.3.2. Aktif Termografi

Pasif yaklaşımın yanı sıra aktif yaklaşımda termal uyarı kaynağı kullanılır. Tahribatsız muayene yöntemleri içerisinde aktif termografi birçok uygulamaya sahiptir. Aktif termografide ki bu çeşitli uygulamalar (termal dürtüleri); darbe termografisi, uzun darbe, lockin termografisi ve titreşim termografisi olarak sayılabilir [42]. Harici ısıtıcı kaynakları kullanılarak muayene edilecek cisme ısı verilir ve daha sonra Şekil 3.7' de görüldüğü üzere termografik incelemesi yapılır.



Şekil 3.7. Termografide aktif yaklaşım [45]

Şekil 3.7' de görüldüğü üzere yüzey harici ısıtıcı kaynakları ile ısıtılmaktadır. Isınan yüzey zaman içerisinde soğumaya başlayacaktır fakat süreksizliğin bulunduğu bölgelerdeki ısı değişimi daha farklı olarak gerçekleştiğinden süreksizlik rahatlıkla tespit edilebilecektir.

#### 3.3.2.1. Darbe Termografisi

Tahribatsız muayene yöntemlerinden biri olan termal termografi yönteminin aktif yaklaşım çeşitlerinden biri olan darbe termografisi genellikle kompozit malzemeleri incelemek için yaygın olarak kullanılan bir aktif yaklaşım çeşididir. Darbe termografisi,

darbe ile ısıtılmış yüzey altı incelemelerinde popüler bir termal tekniktir. Bu teknikte bir veya birden fazla darbeli ısıtma kaynağı kullanılabilir ve yüzeydeki bu kalıcı olmayan ısıtma termal kamera ile görüntülenir [46].

Aslında darbe termografisi, malzemenin ısıtılması ve hemen akabinde ısının zamana bağlı azalması sonucu ortaya çıkan grafiğin kaydedilmesiyle meydana gelir. Kalitatif olarak ise darbe termografisi şu şekilde gerçekleşir: Numunenin ısısı ilk termal daldan sonra şiddetli bir biçimde değişiklik gösterir. Çünkü termal devinim, yüzey altlarında, difüzyon yoluyla ayrıca radyasyon ve konveksiyon kayıpları sebebiyle yayılmaktadır. Eğer süreksizlik tespit edilirse, difüzyon hızı azalır. Bu yüzden yüzey sıcaklığı gözlemlendiğinde, süreksizliğin olduğu alanda normal yerlere göre farklı sıcaklık alanları oluşur [47]

$$t \sim \frac{z^2}{\infty} \quad ve \quad c \sim \frac{1}{z^3} \quad (3.6)$$

t: Gözlem zamanı,

z: Derinlik değeri,

C: Termal görüntünün kaybı,

$\infty$ : Malzemenin termal yayıla bilirliliğidir [48].

Bu uygulamada zaman, derinlik değerinin karesi ile doğru orantılıdır. Termal görüntü kaybı ise derinlik değerinin küpü ile ters orantılıdır. Ayrıca çalışmalar bu yöntemin iki belirleyici faktörünü açığa çıkartmıştır. Gözlenebilir süreksizlikler çoğunlukla yüzeydedirler ve termal görünüm netlikleri iyi değildir. Yapılan uygulamada ki kurallar hesaba katıldığında belirlenecek minimum bozukluğun yarıçapı, bozukluğun yüzeyden başlayarak toplam derinliğinin minimum iki misli daha fazla olması gerekir. Bu durum homojen izotropik malzemelerde geçerlidir [48].

Pek çok uygulama yöntemi vardır. Nokta incelemesi (örnek olarak lazer ya da odaklanmış ışık kaynağının ısı vermesi), yüzey incelemesi (örnek olarak lambalar, flaş lambaları, tarayıcı lazer kullanılmasıyla ısı vermesi) ve çubuk incelemesi (örnek olarak çubuk lambalar, ısıtılmış tel, hava jet çizgileri tarayıcı lazer ile ısı verilmesi) bu yöntemlere örnek olarak verilebilir.

İnceleme yapılacak yerin ısısı imalat yöntemlerine göre çevre sıcaklığından daha fazlaysa termal görüntüleme yapacağımız kaynağın soğuk olması incelemeyi verimli bir hale getirecektir.

Termografi cismin, kendisinden yansıyan kızılötesi ışınımı yardımı ile meydana gelen termal görüntülerin oluşturulmasıdır. Darbe termografisinde inceleme yapılacak cismin üzerine termal darbe uygulanır. Termal darbe uygulandıktan sonra, malzeme yüzey sıcaklığı değişiminin ölçülmesi yüzey altı süreksizliklerin tespit edilmesinde önemli rol oynar. Birinci termal yayılımdan sonra cismin ısısı süratli bir şekilde değişim göstermeye başlar. Çünkü süreksizlerin olması difüzyon hızını azaltır. Bu yüzden süreksizliklerin olduğu bölgeler ile süreksizliklerin olmadığı bölgeler arasında sıcaklık farkı meydana gelir. Isı farkından yararlanılarak kızılötesi kamera yardımıyla hatalar tespit edilir [38, 47].

### 3.3.2.2. Uzun Darbe

Sıcaklık değeri azalışının önemli olmadığı darbe termografisinin aksine, bu yöntemde artmakta olan yüzey sıcaklık değeri uzun darbe uygulamasında görülmektedir. Zaman içerisinde yüzey sıcaklık değerindeki değişim, malzeme nitelikleri ile ilişkilidir. Bu yöntem kısmen zaman-kararlı kızılötesi radyometre olarak isimlendirilir [48]. Bu yöntem kaplamanın kalınlık ölçütünün belirlenmesinde kullanılmaktadır. Örnek olarak deneysel bir bağıntı ile kaplamanın kalınlık değeri belirlenebilmektedir. Bu bağıntı;

$$t_c = \frac{0,36.L^2}{\alpha} \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilir. Bu bağıntıda [48]:

$t_c$ : Termal geçiş süresi,

$L$ : Kaplama kalınlığı,

$\alpha$ : termal yayıla bilirlirlik.

### 3.3.2.3. Titreşim Termografisi

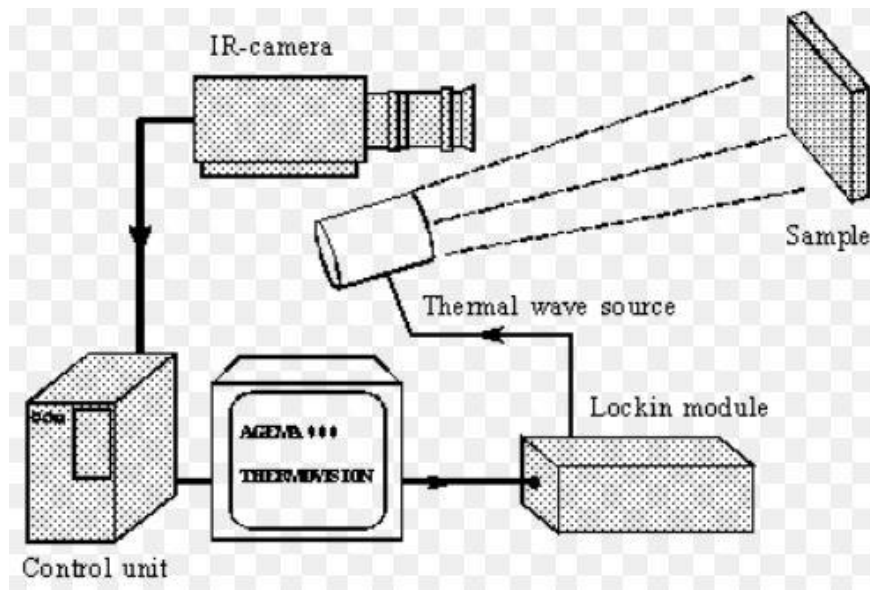
Titreşim termografisi yapı üzerine dışarıdan tatbik edilen mekanik titreşimin etkisiyle, enerjinin doğrudan mekanikten termal enerjiye dönüşmesi ile gerçekleşir. Isı kesinlikle çatlak veya hatanın olduğu yerlerde sürtünmeden serbest kaldığı bir uygulamadır.

Mekanik titreşimin frekansı değiştirilerek termal meyiller bazı özellikli frekans değerlerinde açığa çıkmaktadır.

Bu yöntemin bazı avantajları; diğer termografi yöntemlerinde çok zor gözlemlenebilen hataların bulunması ve oldukça geniş yapısal bölgelerin muayene edilmesinin oldukça basit olmasıdır [48,49].

#### 3.3.2.4. Lockin Termografi

Termografinin bu türünde ısı dalgası, test malzemesine sabit bir frekans değerinde ve sabit düzen içinde iletilir. Lockin termografide darbeyi oluşturan ısı kaynak yerine devamlı sinüs ısı dalgası kullanılmaktadır. Cisim, harmonik modüle edilmiş bir ısı kaynağı tarafından aydınlatılmaktadır. Soğrulan ısı içerisinde yayılmış olan ve fiziksel ısı yayılma ölçütlerinin farklılaştığı cisimler üzerinde yansıdığı objenin yüzey kısmında termal bir dalga meydana getirir. İç kısma girmekte ve yansımakta olan dalgaların karışması nesnenin üzerinde kızılötesi kamera ile belirlenmekte olan harmonik titreşimli radyasyon modelinin meydana gelmesini sağlar. Malzemelerin yüzeyi altındaki hataların üzerinde kalan bölgeler, yüzey altı hataları bulunmayan bölgelere göre değişik bir faz meydana getireceklerdir. Lockin sistemi, faz ve büyüklük bilgilerini değerlendirdikten sonra bu bölgelerin tanımlamasını ve çizimlerini yapar [49,50]. Şekil 3.8’ de termografi çeşitlerinden olan lockin termografi, şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.8. Lockin termografinin şematik gösterimi [49].

### 3.3.2.5. Darbe Faz Termografisi

Lockin termografisinin frekans/faz yönünden geliştirilmesiyle oluşan bir tür termografi türüdür. Bu türde termal uyarı test malzemesine karışık frekans ve genlik değerlerinde gönderilir [50].

### 3.4. Termografinin Avantajları ve Dezavantajları

Günümüzde en önemli hasarsız kontrol yöntemlerinden biri olan termografinin pek çok avantajı vardır. Bu yöntemi üstün kılmakta olan avantajları aşağıdaki gibidir [51]:

- Elde edilen neticelerin kolay bir şekilde resim formatına dönüştürülebilmesi,
- Hasarsız bir kontrol yöntemi olması,
- Yapılan uygulamaların yaygın olması,
- Diğer kontrol yöntemlerine göre hızlı olması
- Kızılötesi ışınların iyonlaştırıcı özelliği olmamasından dolayı canlı ve incelemede olan cisim için radyasyon, emniyet yönünden herhangi bir sorun açığa çıkartmamaktadır,
- Malzemenin iç bölgesinde herhangi bir değişikliğe neden olmaz,
- Geniş uygulama alanına sahiptir,
- Neticeler kolaylıkla yorumlanabilir.

Termografi yönteminin bir takım avantajlarının yanı sıra bu yöntemin kullanımında karşı karşıya kalınan zorluklar, dezavantajlar da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar aşağıdaki gibidir [48]:

- Kızılötesi kameraları fiyatlarının oldukça yüksek olması,
- Termal kayıpların termal görüntüler üzerindeki olumsuz etkisi,
- Testi yapılacak olan malzemenin düşük yayıcılığa sahip olması,

- Yüzey altında sınırlı bir bölgeye kadar inceleme imkânı vermesi (çok katlı tabakalı kompozit yapılarda bu yöntem verimli değildir),
- Genişçe bir bölgeye, az zamanda, yüksek enerjiyi eşit bir şekilde yayabilmenin zor olmasıdır.

### 3.5. Termal Kamera

İnsan gözü yalnızca elektromanyetik tayfta bulunan görünür ışınları görebilmektedir [52]. Bunun dışında kalan diğer tüm ışınları, kızılötesi ışın gibi, göremez.  $-273^{\circ}\text{C}$  üzerinde bir ısı değerine sahip tüm cisimler kızılötesi ışın yayarlar. Cisimlerin sıcaklık değerlerine bağlı olarak az ya da çok kızılötesi ışıma yaparlar. Ortama yayılmakta olan enerji insan gözü ile görülemeyen kızılötesi aralığında yayılırlar. Termal kameralar tamamen bu prensibe göre çalışırlar. Tam olarak termal kameralar, elektromanyetik tayfta bulunan ve normalde insan gözü ile görülemeyen kızılötesi ışınları görünebilir hale getirir.

Termal kameraların yapısı incelendiğinde, bir cisimden gelmekte olan kızılötesi enerji (A), mercek (B) sayesinde kameranın içerisindeki kızılötesi detektör (C) üzerine düşürülmektedir. Bu detektörün görevi termal resmin işlenebilmesi için gerekli verileri elektronik sensörlere (D) göndermektir. Bu işlemler sonrasında veriler bizlerin görebileceği görüntüye çevrilerek kameranın ekranında (E) gösterilmektedir. Şekil 3.9' da termal kameranın parçaları görülmektedir.



Şekil 3.9. Termal Kameranın Yapısı [52]

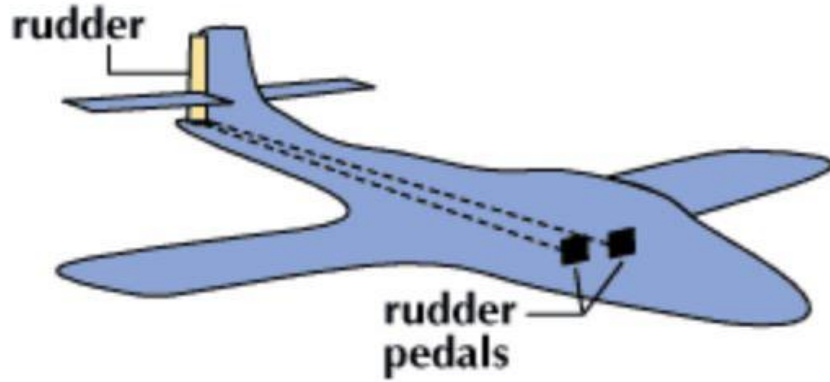
Gözle göremediğimiz fakat oldukça önemli sorunlara sebebiyet verebilecek küçük süreksizlikleri tam olarak tespit edebilmemize olanak tanır [52].

### **3.6. Uçaklarda Kullanılan ve Termal Termografi Uygulanan Balpeteği Yapılar**

Termal termografi, günümüz modern ticari uçaklarda yapının yüzeyindeki herhangi bir ısı farklılığını tespit etmek için kullanılabilir. Örnek olarak uçak üzerinde konektör takılı ise azda olsa ısınır fakat konektör takılı değilse hiçbir sıcaklık belirtisi göstermez. Termal kameralar ile konektörlere bakıldığında ısınma belirtisi göstermeyen konektörün takılmadığını veya takılı olarak dışarıdan gözükmesine rağmen yerine tam oturmadığı anlaşılır. Bu sayede erişimi zor yerlerdeki konektörlerin doğru takılıp takılmadığı anlaşılmış olur. Günümüz modern uçaklarının balpeteği yapılarında termal termografinin kullanıldığı iki ana bölge vardır. Bunlardan birisi istikamet dümeni (rudder) diğeri ise irtifa dümenidir (elevatör).

#### **3.6.1. İstikamet Dümeni (Rudder)**

İstikamet dümeni, uçakların ana kontrol yüzeylerinden bir tanesidir. Dikey stabilizenin firar kenarında bulunur. Uçağın dönme eylemini kontrol eder. Yani dikey eksen etrafındaki hareketini sağlar. İstikamet dümenine sağ tarafa doğru hareket verildiğinde hava akımı istikamet dümeninin yüzeyine çarpar. Çarpan hava akımı nedeniyle uçağın kuyruk bölgesi sol tarafa hareket eder. Uçağın burun bölgesi ise sağ tarafa hareket eder. Uçak kokpiti içerisinde bulunan istikamet dümeni pedalları ile kontrolü sağlanır. Pedallar asimetrik bir işleyişe sahiptir. Sağ pedala basılması durumunda uçağın sağ tarafa dönmesi sağlanır. Sol pedala basılması durumunda ise uçağın sol tarafa dönmesi sağlanır [53]. İstikamet dümeni ve istikamet dümeni pedalları arasındaki mekanik bağlantı Şekil 3.10’ da görülmektedir



Şekil 3.10. İstikamet dümeni ve istikamet dümeni pedallarının gösterimi [54]

Uçaklar devamlı iniş ve kalkış işlemini gerçekleştirdiklerinden dolayı düz uçuş esnasında yaklaşık  $-52^{\circ}\text{C}$  ve yerde olduğunda o anki gündelik ısıya maruz kalır. Sürekli maruz kaldığı bu ısı farkından dolayı balpeteği yapıları içerisinde su birikmesi oluşabilir. Oluşan suyun tespit edilebilmesinde termografik inceleme yönteminden yararlanılır [55]. Şekil 3.11’ de istikamet dümenine termografik muayene yapıldı ve yapılan bu muayene sonucunda suyun tespit edildiği termal görüntüsü alındı.



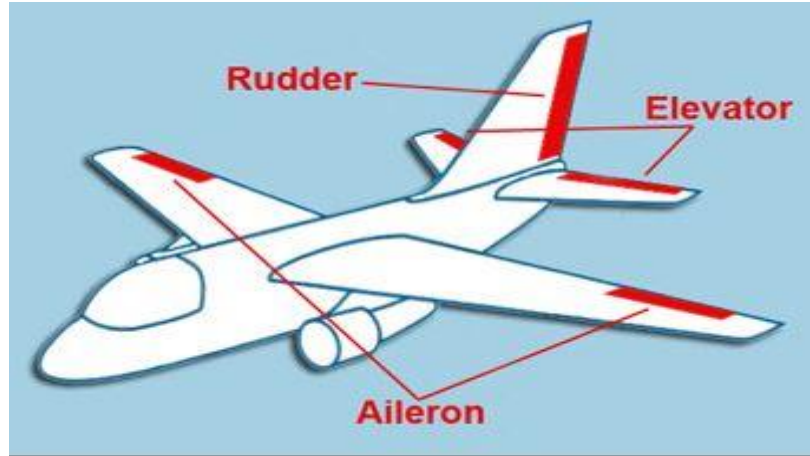
Şekil 3.11. Airbus A320 uçağının istikamet dümeninde yapılan bir termografik muayene sonucunda tespit edilen suyun görüntüsü

İstikamet dümeninde inceleme yapılmadan önce yüzey ısıtılır. Daha sonra ısıtılma işlemine bırakılır ve bir süre soğumaya bırakılır. Yüzeye yakın bölümde bulunan suyun

olduğu bölgeler ve suyun olmadığı bölgeler arasında sıcaklık farkı meydana gelir. Termal kamera ile yüzeye bakıldığında suyun olmadığı bölgeler, suyun olduğu bölgelere göre daha çok ısınacaktır. Bu termal görüntüde sıcaklığın daha düşük olduğu bölgeler diğer bölgelere göre koyu renkle gösterilir. Fakat her termal görüntüde aynı renklendirmenin uygulanma zorunluluğu yoktur. Termal görüntülerdeki renklendirmeler ayarlanabilir. Şekil 3.11’ de termal görüntünün sağ kısmında yüzey sıcaklık değerleri renklendirmesiyle birlikte verilir. Ortalama 23°C ile 60°C arasında sıcaklık değerleri görülmektedir. Suyun olmadığı bölgelerin ısı değeri 60°C civarlarına yükselir. Termal görüntüde daha sıcak bölgeler açık renkle gösterilir. Suyun tespit edildiği bölgeler ise 30°C civarlarında kalır. Termal görüntüde daha soğuk bölgeler koyu renkle gösterilir. Bu sıcaklık farkından yapı yüzeyindeki su rahatlıkla tespit edilir.

### **3.6.2. İrtifa Dümeni (Elevatör)**

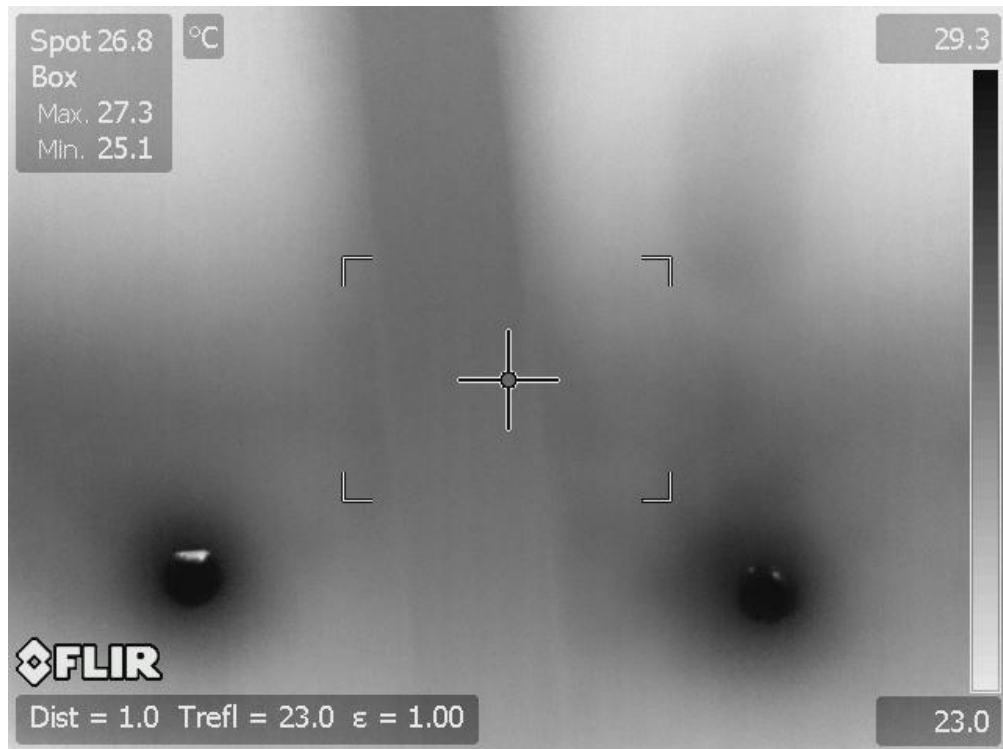
İrtifa dümeni, uçakların üç ana kontrol yüzeylerinden bir tanesidir. Yatay stabilizenin firar kenarında bulunur. Uçağın yunuslama (aşağı-yukarı) eylemini kontrol eder. Yani uçağın boylamasına ekseninde hareketini sağlar. İrtifa dümenine aşağı tarafa doğru hareket verildiğinde hava akımı irtifa dümeninin yüzeyine çarpar. Çarpan hava akımı nedeniyle uçağın kuyruk bölgesi yukarı tarafa hareket eder. Uçağın burun bölgesi ise aşağı tarafa hareket eder. Sol ve sağ tarafta bulunan irtifa dümenleri simetrik olarak sürekli aynı yönde hareket ederler. Uçak kokpiti içerisinde bulunan lövyenin ileri-geri hareketi ile irtifa dümeninin kontrolü sağlanır. Löye ileri doğru hareket ettirildiğinde irtifa dümenleri aşağı doğru hareket edecektir ve uçak burun aşağı dalış pozisyonuna geçmeye başlayacaktır. Löye tam tersi geri doğru hareket ettirildiğinde ise irtifa dümenleri yukarı doğru hareket edecektir ve uçak burun yukarı tırmanış pozisyonuna geçmeye başlayacaktır [53]. Şekil 3.12’ de ana kontrol yüzeyleri görülmektedir.



Şekil 3.12. İrtifa dümeni ve diğer ana kontrol yüzeyleri [53]

İstikamet dümeni gibi irtifa dümeni de uçağın periyodik hareketleri süresince (iniş-kalkış) yaklaşık olarak 70-80°C sıcaklık farkına maruz kalırlar. Bu sebeple irtifa dümeninin balpeteği yapılarında su görülebilir.

Şekil 3.13' te irtifa dümenine termografik muayene yapıldı ve termal görüntü alındı. Alınan bu görüntü incelendiğinde su ile karşılaşılmadığı anlaşıldı.



Şekil 3.13. Airbus A321 uçağının irtifa dümeninde yapılan bir termografik muayene termal görüntüsü

İrtifa dümenine yapılan termografik muayene sonucunda su ile karşılaşılmadı. İrtifa dümeninin termografik muayenesinde yüzey alansal olarak ısıtılır. Yüzey tamamen aynı sıcaklık değerine gelir. Isıtılan bu yapıdan ısı kaynakları kaldırılır ve bir süre soğumaya bırakılır ve termal kamera ile incelenir. Bu yapılan işlemler sonucunda su bulunamadı. Su bulunmuş olsaydı bile her su tespit edildiğinde tamir işlemi uygulanmak zorunda değildir. Belirli bir değerin ( $3000 \text{ mm}^2$ ) üzerine çıktığı zaman tamir işlemi uygulanır.



## 4. BÖLÜM

### BALPETEĞİ KOMPOZİT YAPILARIN TAMİR METOTLARI

#### 4.1. Balpeteği Yapının Tamire Uygunluğunun Belirlenmesi

Balpeteği yapıda bir alanın onarımı yapılırken, kullanılan malzemeler ile ana parçanın uyumu gereklidir. Onarımı yapılan alanın dayanıklılığı ile ana parçanın dayanıklılığı ve tokluk değeri birbirine yakın olması istenir. Aksi bir durumda ana malzemeyi meydana getiren bölgenin dayanımı daha yüksek olur ise yük ana malzemeye biner. Tam tersi bir durumda, onarımı yapılan alanın dayanımı daha yüksek olur ise bu seferde yük, onarımı yapılan alana daha çok etki edecektir. Bahsedilen her iki olayda istenmeyen olaylardır. Onarım işleminin mukavemetini değiştirebilen üç temel öge bulunmaktadır. Bunlar; reçine, fiberin cinsi ve fiberin alıştırma yönüdür [17].

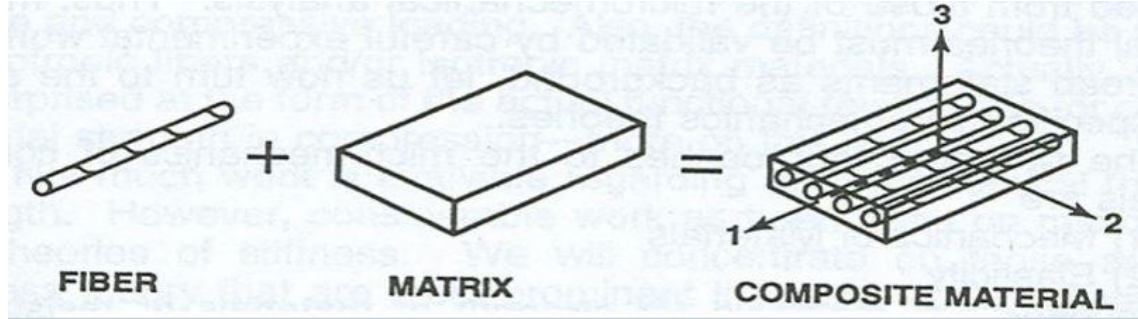
#### 4.2. Matris Tercihi ve Tatbik Edilmesi

Fiber malzemelerin elastik modülleri birbirinden farklıdır ve fiberlerin seçiminde önemli rol oynar. Mesela karbon fiberin tercih edildiği bir uygulamada karbon fiber yerine cam fiber kullanıldığında, aynı tokluk değerini yakalamak için normalde kullanılan karbon fiberin en az üç katı cam fiber kullanması gerekir. Genelde yapılacak tamirler için aynı çeşit fiber kullanılması uygundur.

#### 4.3. Fiberlerin Yerleştirme Yöntemleri

Malzeme tokluğunun sağlanmasında fiberlerin yönlerindeki uygunluk önemli ana etkenlerdendir. Sürekli tamirler için yapılan tamirin ömrü malzeme ile aynı olacak gibi düşünülerek yapılır. Yapılan tamirlerde malzeme ömrü dışında özel durumlarda dikkate alınmalıdır. Bu özel durumlara ısı tutucu, yıldırım koruması ve anten geçirgenliği örnek

olarak verilebilir [17]. Şekil 4.1’ de fiberler belirli bir yön düzeninde yerleştirildiği görülmektedir.



Şekil 4.1. Fiber malzemenin matris malzeme içerisine yerleştirilmesi [56]

Fiberler kendilerinin boyları yönünde, kompozit malzemenin mekanik niceliklerini iyileştirirler. Yüksek sıcaklık değerlerinde kür edilmiş ya da üretim aşamasından sonra performans değerini arttırmak için yeniden kür işlemi uygulanmış malzemelerin tamirlerinde yararlanılacak malzemelerinde aynı özelliklere sahip kür işlem süreci tatbik edilmelidir. Tamir işlemi süresince temizlik ve sıcaklığın değeri dikkatli bir şekilde takip edilmelidir. Prepreg yöntemi, yapıştırma yöntemleri sıcaklığa karşı çok hassastırlar. Isı ayarlamalarında; ısı battaniyeleri, fırın, otoklav, ısı lambaları ve sıcak hava üfleyicileri kullanılır [17].

#### 4.4. Cam Elyafı Tamiri

Islak yayma yöntemi ile yapılmakta olan cam elyafı tamirinde epoksi ile yapıştırma anında başka katkı malzemelerine de ihtiyaç vardır. Genelde 250°F sıcaklık değerindeki kür, önceden reçine emdirilmiş cam elyaf (prepreg) yöntemi ile yapılmakta olan tamirler için kullanılır. 150°F sıcaklık değerindeki kür ise, ıslak yayma yöntemi ile yapılmakta olan tamirler için kullanılır [17].

Yapılacak olan tamirin ölçüsü 250°F sıcaklık değerindeki kür ile yapılacak olan prepreg tamirler için pek önemi yoktur. Büyük vakum torbalarının kullanılması zorluğundan dolayı, otoklavda yapılacak kür tercih edilir. Ayrıca otoklavda yapılan kür mekanik özellik açısından vakum torbasına göre daha üstün özellikte olduğu bilinmektedir.

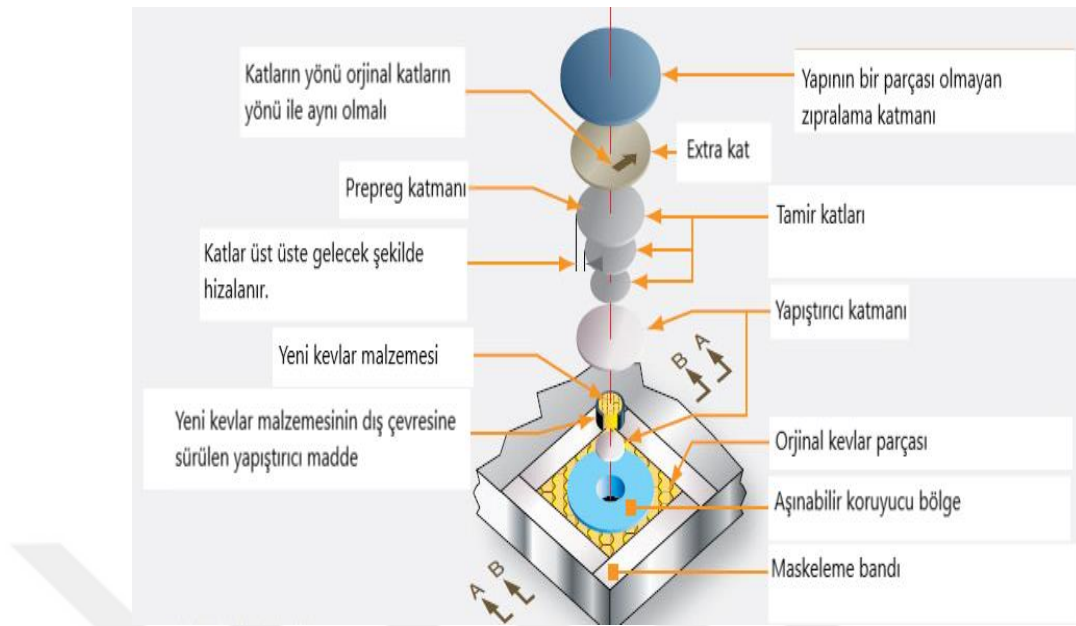
#### 4.5. Karbon Tamiri

Son dönemlerde hava aracı malzemelerinin üretilmesinde karbon fiber takviyeli plastik malzemeler diğer kompozit çeşitlerine göre daha fazla tercih edilmektedir. Karbon fiber plastik malzemenin tamiri farklı kür sıcaklık değerlerinde prepreg ve ıslak yayma yöntemleriyle yapılmaktadır. Karbon tamirinin, temelini normal malzemenin üretiminde kullanılan kür sıcaklığı ile tamir işlemi sürecinde de aynı kür sıcaklık değerinin kullanılması oluşturur.

Islak yayma yöntemi ile yapılmakta olan tamirlerde kuru dokuma malzemesi ve tabaka haline getirilmiş reçine kullanılır. Karbon fiber tamirlerinde, reçine oranı 1.3:1 olması gerekir. Verilen bu “1.3:1” oran şuna kadar yapılmış testlerin sonuçları temel alınarak söylenmektedir. Tamir işleminde dokuma malzemesinin içerisindeki hava vakum ile alınır ve reçine tatbik edilir. Bu işlem devamında da dokuma katmanları, tamiri yapılacak bölgeye serilir [17].

#### 4.6. Kevlar Malzemelerin Tamiri

Balpeteği tamirlerinde genel olarak hangi fiber kullanılmış ise orijinal fiber türü korunarak tamir işlemi gerçekleştirilir. Bu duruma aykırı örnek olarak kevlar malzemesini söyleyebiliriz. Kevlar malzemesinin tamiri için cam elyafları kullanılır. Cam elyaf katmanları kevlar tamirlerinde seçilmiş en iyi maddelerdir. Kevlar malzemesine karşın cam elyafı işlemek daha kolaydır buda cam elyafın tercih edilmesinin temel sebeplerinden bir tanesidir. Buna ek olarak cam elyafın kullanımı maliyet açısından da avantaj sağlamaktadır. Şekil 4.2’ de hasarlı olan kevlar yapının değişimi görülmektedir.



Şekil 4.2. Hasarlı kevlar yapının değiştirilmesi [20]

#### 4.7. Tamir İşleminde Yapışkanın Önemi

Kompozit tabakalı yapıların tamiri için yapıştırıcılar birleştirme görevi üstlenirler. Kimyasal özellikleri doğru analiz edilip uygun yerlerde kullanımı çok önemlidir. Yapıştırıcının çeşidi, kür özellikleri ve dereceleri, tatbik edilmeden yüzey temizliği yapılacak tamirin kalitesine doğrudan etki etmektedir.

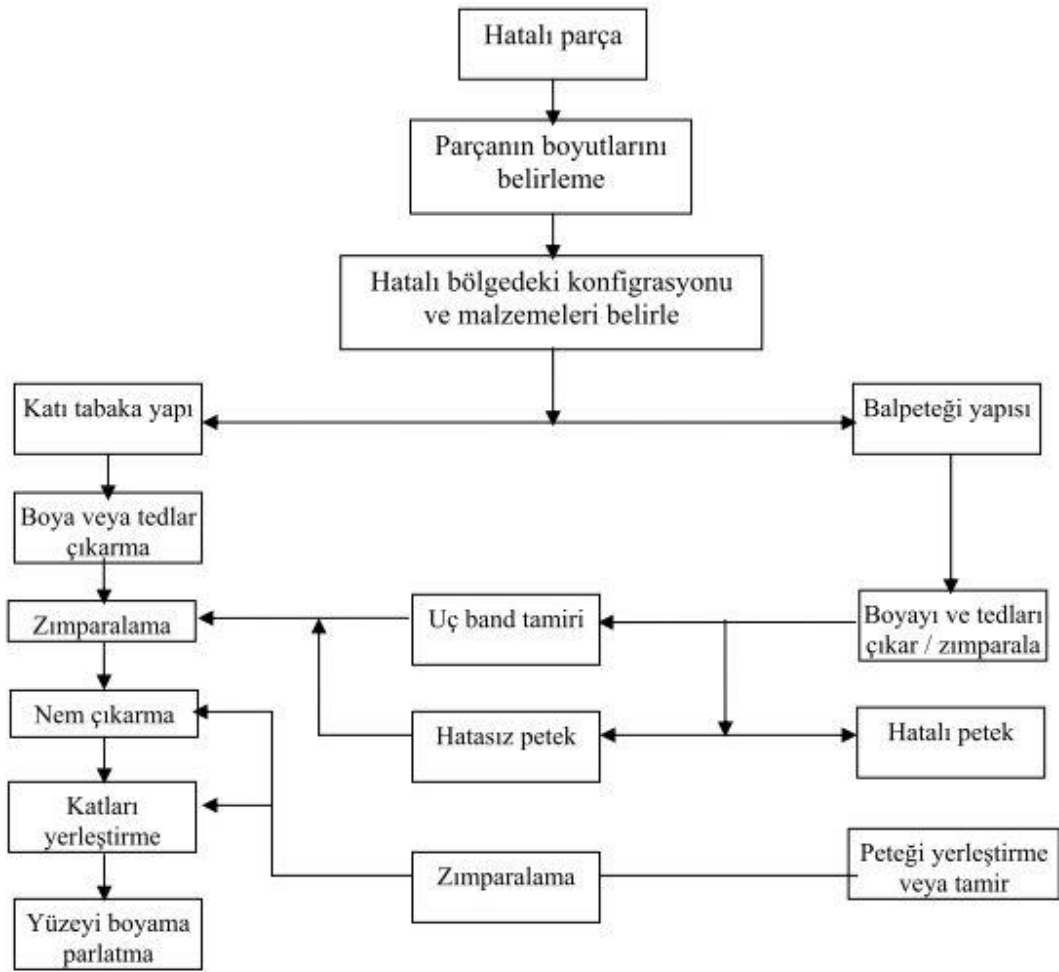
#### 4.8. Petekli Yapıların Seçimi

Hasar almış balpeteği görünümündeki yapıların tamiri esnasında yapının aynı malzeme ile üretilmiş olması gerekir. Buna ek olarak tamir işlemi için yeni petek yapılarının orijinal boyutlarına göre daha küçük ve daha yüksek yoğunluklu olması gerekmektedir. Balpeteği yapıların tamiri esnasında farklı malzeme kullanmak zorunda kalınabilir. Bu durumda uyuşum tablolarına bakılır. Ayrıca korozyon oluşma ihtimaline karşı alüminyum ve karbon esaslı yapılar asla yan yana kullanılmamalıdır.

Oldukça küçük tamirler için alüminyum yapıların yerine kevlar yapıları tercih edilebilir. Bu tür durumlarda aynı yoğunlukta olan daha küçük hücreler seçilmelidir. Yine oldukça küçük tamirler için balpeteği yapısı yerine dolgu macunu ile boşluklar tamamlanabilir. Fakat küçük boyutlu olmayan tamirlerde dolgu macununun kullanılmaması gerekir. Kullanılmama sebebi ise dolgu macununun yüksek tokluk değerine sahip olmasıdır.

#### 4.9. Tamir Şeması

Balpeteği tabakalı yapıların uçak parçaları üzerinde yapılmakta olan tamirlerin tatbik edilmesinde tamir akış şeması temel alınarak ona göre işlemler uygulanır. Tamir işleminin uygulanmasında bakım personeline referans olacak üretici firma tarafından hazırlanan bakım kitapları mevcuttur. Tamamen bu kitaplara bağlı kalarak tamir işlemi başından sonuna kadar uygulanmalıdır. Şekil 4.3’ te balpeteği yapının tamir şeması görülmektedir.



Şekil 4.3. Balpeteği yapının tamir akış şeması [17]

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL YÖNTEM

#### 5.1. Deneysel Çalışma

İstikamet dümeni ve irtifa dümeni uçağın periyodik hareketleri süresince yaklaşık olarak 70-80°C sıcaklık farkına maruz kalırlar. Bu sebeple irtifa dümeni ve istikamet dümenindeki balpeteği yapılarında su görülebilir. Yapılan bu çalışmada Şekil 5.1’ de görülmekte olan uçağın istikamet dümenine termografik muayene uygulandı.



Şekil 5.1. Termografik inceleme yapılan uçağın istikamet dümeni

Balpeteği yapıda, suyun tespit edilmesindeki en iyi yöntem termografik muayenedir. Termografik muayene uygulanmadan önce suyun tespit edilebilmesi için yüzey ısıtıldı. Bu ısıtma işlemi için PHG600-3 ısı tabancası (heat gun) kullanıldı.



Şekil 5.2. Isı tabancası [57]

Yüzey iyice ısıtıldıktan sonra termal kamera ile inceleme yapıldı. Yapılan bu çalışmada termografik inceleme için FLIR T335 termal kamera kullanıldı.



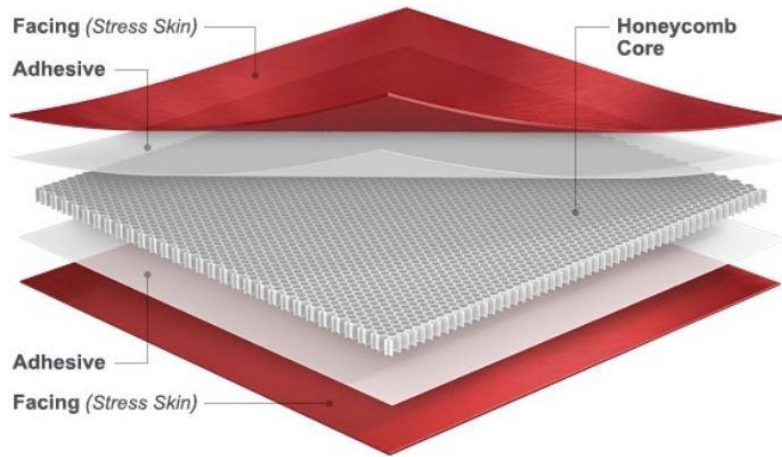
Şekil 5.3. Termal kamera [58]

Termal kamera ile alınan termal görüntüler incelendiğinde su tespit edilen bölgenin alanı  $3000 \text{ mm}^2$  ve üzerinde olduğu tespit edilen bölgelere tamir işlemi uygulandı. Suyun bulunduğu bölgenin alanı  $3000 \text{ mm}^2$  altında ise hiçbir tamir işlemi uygulanmadı. Su miktarının takip edilmesi için ilerleyen zamanlarda kontrol amaçlı termografik muayene planlandı.

## 6. BÖLÜM

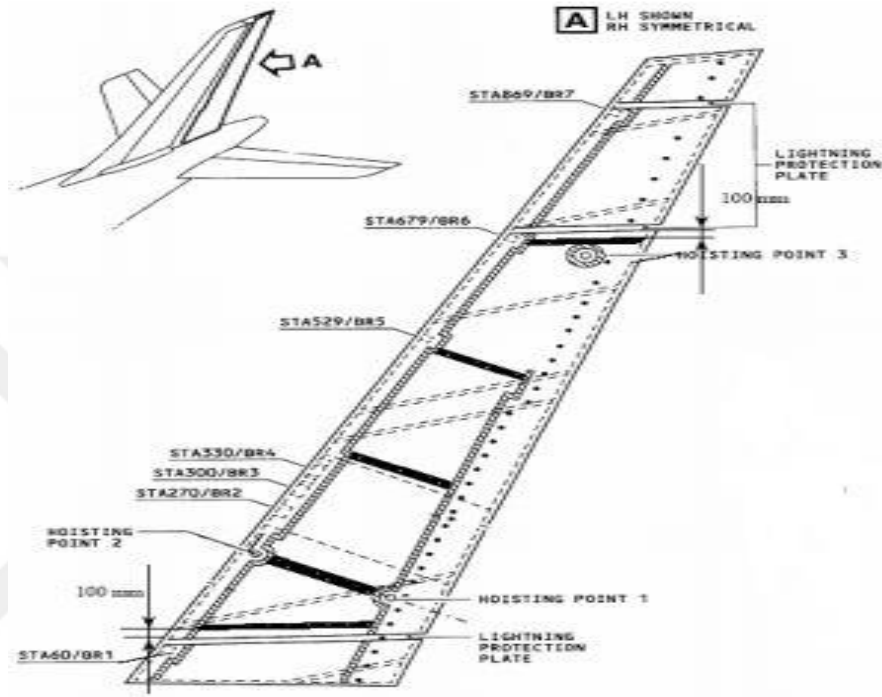
### TERMOGRAFI YÖNTEMİ İLE SUYUN TESPİTİ VE BALPETEĞİ YAPININ TAMİRİ

Airbus A320 tipi uçakları için kullanılmakta olan ve ana uçuş kontrol yüzeylerinden bir tanesi olan istikamet dümeni (rudder) bölümüne çeşitli sebeplerden yapı içerisine su girebileceği ön görülmüştür. Bundan dolayı planlanan bakım paketi içerisinde istikamet dümeninin termografik kontrol kartı yer almaktadır. Yapı içerisinde su oluşup oluşmadığını kontrol etmek amacıyla, istikamet dümeninin askı noktaları belirli aralıklarla termografik muayene ile kontrol edilmektedir. İstikamet dümeninin kompozit yapısı karbon takviyeli yüzeyler ve kevlar bazlı petek hücrelerinden meydana gelmektedir. Bu gibi balpeteği yapıların içerisine su girmiş ise, malzeme içerisindeki suyu tespit edebilmek için, termografi uygulanacak en iyi hasarsız kontrol yöntemlerinden bir tanesidir. Şekil 6.1’ de balpeteği kompozit yapının temel bölümleri görülmektedir.



Şekil 6.1. Balpeteği kompozit yapısının bölümleri [32]

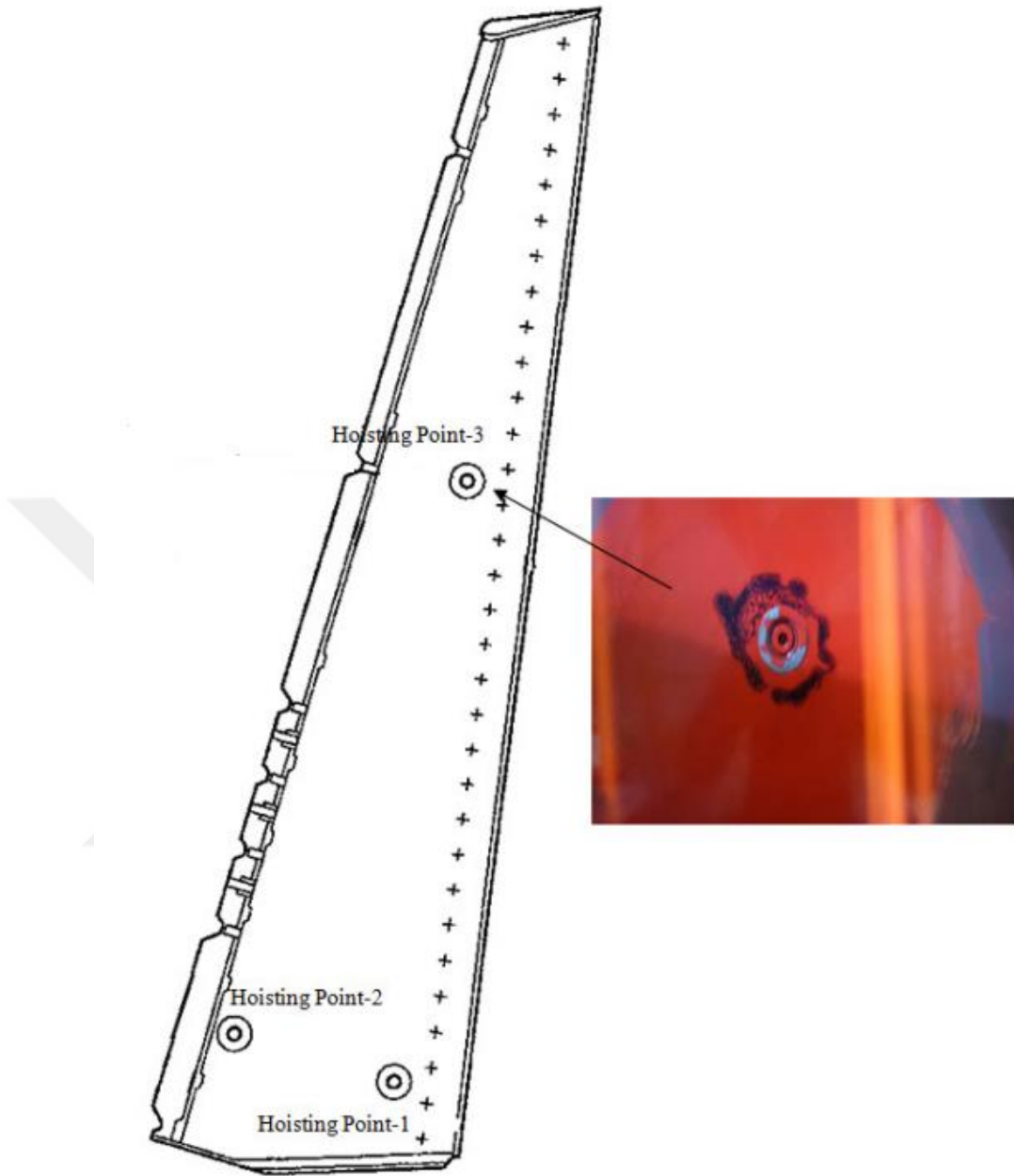
Üst yüzey, alt yüzey ve honeycomb core (balpeteği yapısı) olmak üzere temelde üç bölümden oluşmaktadır. Yüzeyler ve balpeteği yapı arasına uygun yapıştırıcı (adhesive) kullanılmaktadır [32]. Şekil 6.2’ de istikamet dümeni üzerinde bulunan askı noktaları görülmektedir.



Şekil 6.2. İstikamet Dümeni üzerindeki askı noktalarının (hoist point) gösterimi [31]

### 6.1. Termografi Yöntemi Kullanılarak Su Tespiti

İstikamet dümeninin (rudder) içyapısında su belirtilerinin olup olmadığını tespit edilebilmesi için ilk olarak tap test ile genel olarak incelendi. Daha sonra balpeteği yapılarına termografi yönteminin uygulanmasına karar verildi. İnceleme, yapılacak olan bölgeye öncelikle belirli bir süre ısı verilmiştir. Daha sonra malzemeye uygulanan ısı kaldırılıp malzemenin bir miktar kendiliğinden soğumasıyla sıcaklık farkı oluşturulmuştur. Daha sonrada malzeme termal kamerayla incelenmiştir. İnceleme sonucunda üç noktada su tespit edildi. Bu çalışmada elde edilen termal görüntüler aşağıda verilmiştir. Şekil 6.3’ te termografik inceleme yapılacak olan istikamet dümeninin sol yüzeyinde bulunan askı noktaları görülmektedir.



Şekil 6.3. İstikamet dümeninin sol yüzünde bulunan askı noktaları (hoist point) ve su tespit edilen 3 numaralı askı noktasının normal görünümü

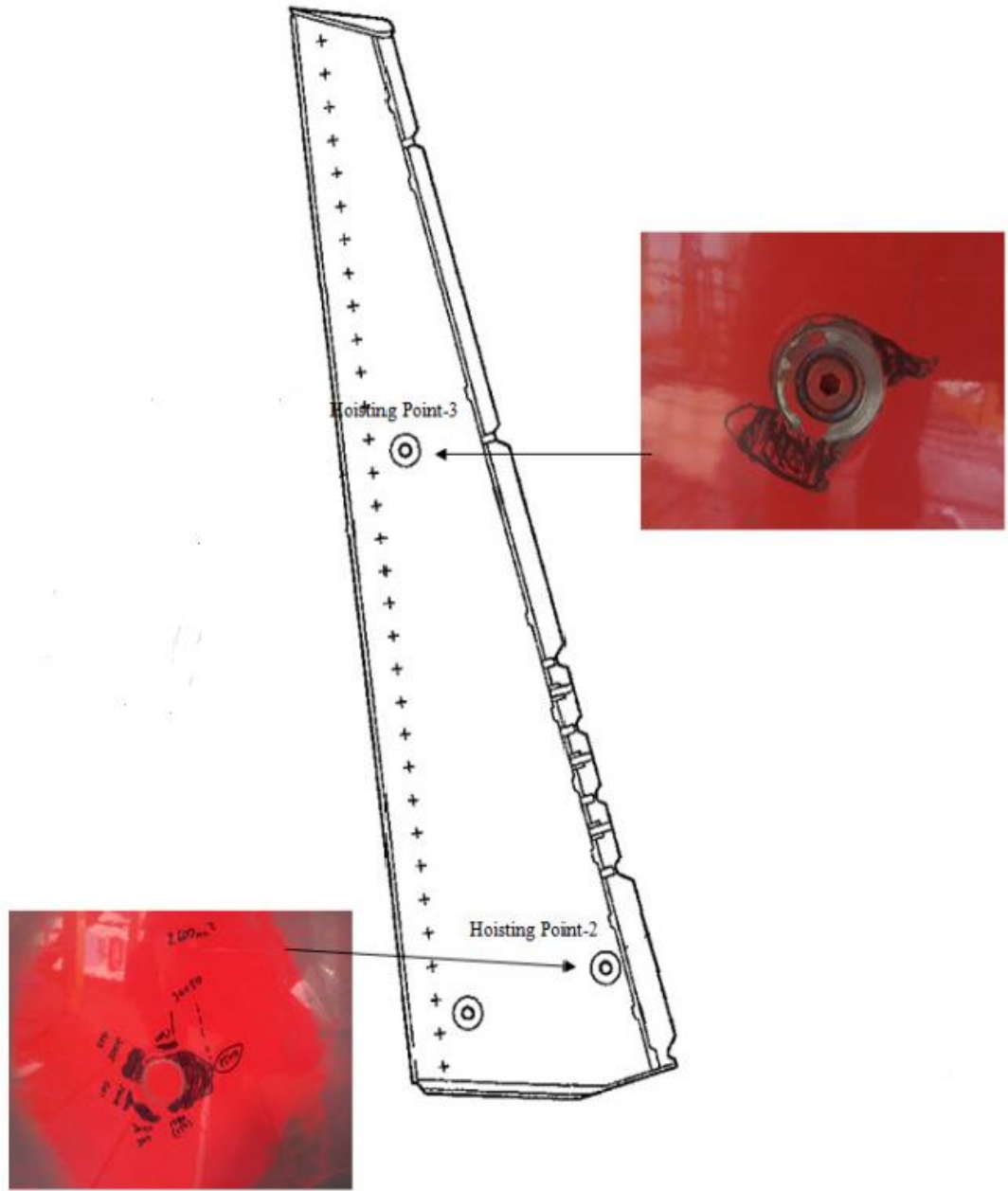
İstikamet dümeninin sol tarafında Şekil 6.3' te görüldüğü üzere toplamda üç tane askı noktası (hoist point) bulunur. 1 numaralı ve 2 numaralı askı noktalarında termografik inceleme sonucunda su tespit edilmemiştir. 3 numaralı askı noktasında ise termografik inceleme sonucunda su tespit edilmiştir. Şekil 6.3' te suyun tespit edildiği, 3 numaralı askı noktasının üzerinde suyun görüldüğü yerler işaretlenmiştir. Yapılan termografik muayene sonucunda istikamet dümeninin sol yüzündeki 3 numaralı askı noktasında Şekil 6.4' te gösterildiği gibi su tespit edilmiştir.



Şekil 6.4. İstikamet dūmeninin sol yüzünde bulunan, 3 numaralı askı noktasında ki suyun termal kamera ile görüntülenmesi

Termografik inceleme yapılmadan önce malzemenin ısı tabancası (heat gun) tarafından ısıtılmasıyla birlikte suyun olduğu bölgeler ile diğer bölgeler arasında sıcaklık farkı oluşturulur ve bu sayede suyun olduğu bölgeler kolaylıkla tespit edilebilirler. Suyun olduğu yerler termal kamerada daha koyu renkte görünmektedir. Yapılan hesaplamalar sonucunda suyun yaklaşık olarak alanı  $3050 \text{ mm}^2$  olarak tespit edilmiştir. Bu suyun ölçüsü, yapısal tamir kitabına (SRM) bakıldığında izin verilebilir aralığın üzerinde olduğu görülmüştür. SRM’de izin verilebilir aralık  $3000 \text{ mm}^2$  ve altındaki değerleri kapsamaktadır. İzin verilebilir aralığın üzerinde olduğu için balpeteği kompozit yapıya bir tamir işlemi uygulanması gerekmektedir.

Böylelikle istikamet dūmeninin sol yüzünün incelemesi tamamlanmış ve sol yüzeyin incelemesinden sonra sağ tarafının muayenesine başlanmıştır. İstikamet dūmeninin sağ tarafında Şekil 6.5’ te görüldüğü üzere toplamda üç tane askı noktası (hoist point) bulunmaktadır.



Şekil 6.5. İstikamet dümeninin sağ yüzünde bulunan askı noktaları (hoist point) ve su tespit edilen 2 ve 3 numaralı askı noktalarının normal görünüşleri

1 numaralı askı noktasında, yapılan termografik inceleme sonucunda su tespit edilmemiştir. 2 ve 3 numaralı askı noktalarında ise termografik inceleme sonucunda su tespit edildi. Şekil 6.5' te suyun tespit edildiği 2 ve 3 numaralı askı noktalarında suyun görüldüğü yerler işaretlenmiştir. Yapılan termografik inceleme sonucunda, su tespit edilen bölgeler Şekil 6.6' da görülmektedir.



Şekil 6.6. İstikamet dümeninin sağ yüzünde bulunan, 2 numaralı askı noktasının etrafındaki suyun termal kamera ile görüntülenmesi

Termal görüntüye bakıldığında, koyu renk ile gösterilen bölgeler suyun olduğunu göstermektedir. SRM’de izin verilebilir aralık,  $3000 \text{ mm}^2$  ve altındaki değerleri kapsamaktadır. Gerekli hesaplamalar yapıldığında, 2 numaralı askı noktasında bulunan suyun alanı yaklaşık olarak  $2600 \text{ mm}^2$  olarak tespit edilmiştir. Bu suyun ölçüsü  $3000 \text{ mm}^2$  den daha az bir değerde olduğundan dolayı izin verilebilir aralıkta olduğu tespit edilmiştir. İzin verilebilir aralıkta olduğu için herhangi bir tamir işlemi uygulanmamıştır. Yapı içerisindeki suyun durumunun ilerleyen zamanlarda takip edilebilmesi için belirli aralıklarla termografik muayene planlanmıştır. Uygulanan termografik inceleme sonucunda su tespit edilen, istikamet dümeninin sağ yüzündeki bir diğer bölge Şekil 6.7’ de görülmektedir.



Şekil 6.7. İstikamet dümeninin sağ yüzünde bulunan, 3 numaralı askı noktasının çevresindeki suyun termal kamera ile görüntülenmesi

Termal görüntüye bakıldığında, koyu renk ile gösterilen bölgeler suyun olduğunu göstermektedir. SRM’de izin verilebilir aralık,  $3000 \text{ mm}^2$  ve altındaki değerleri kapsamaktadır. Gerekli hesaplamalar yapıldığında, 3 numaralı askı noktasının çevresinde bulunan suyun alanı yaklaşık olarak  $800 \text{ mm}^2$  olarak tespit edilmiştir. Bu suyun ölçüsü  $3000 \text{ mm}^2$  den daha küçük bir değerde olduğundan dolayı izin verilebilir aralıkta olduğu tespit edilmiştir. İzin verilebilir aralıkta olduğu için herhangi bir tamir işlemi uygulanmamıştır. Yapı içerisindeki suyun durumunun ilerleyen zamanlarda takip edilebilmesi için belirli aralıklarla termografik muayene planlanmıştır.

## 6.2. Balpeteği Yapının Tamiri

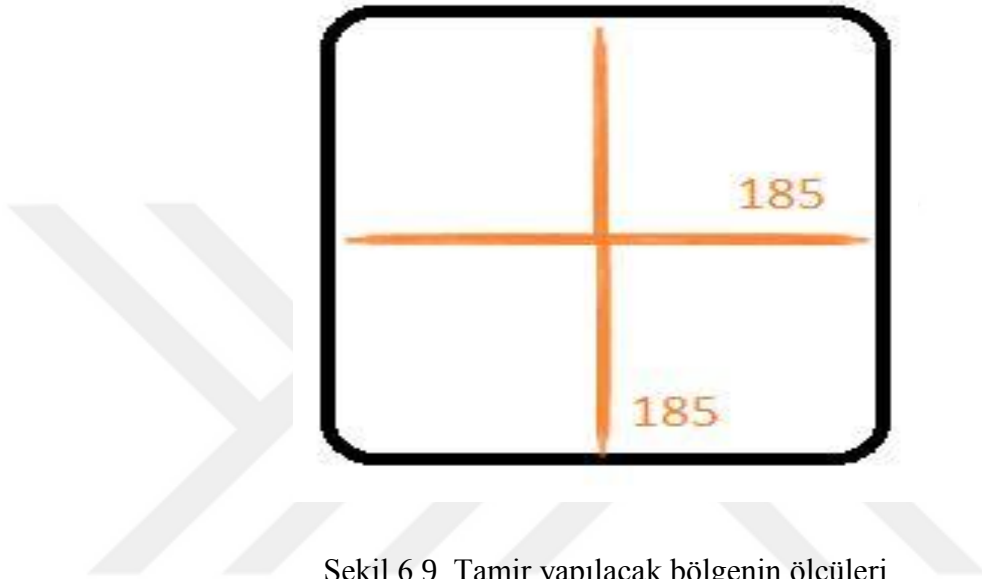
İstikamet dümeninin sol yüzeyinde bulunan 3 numaralı askı noktasının çevresinde tespit edilen su miktarı limit dışı çıktığından dolayı balpeteği kompozit yapının tamir edilmesi (içerisindeki suyun alınması) gerekmektedir.

Tamir işleminin uygulanabilmesi için istikamet dümeninin uçak üzerinden sökülmesi gerekmekte ve yer ile paralel konumda tamir işleminin uygulanması gerekmektedir. Şekil 6.8’ de görüldüğü üzere yere paralel konuma getirebilmek için istikamet dümeni uygun sehpaşının üzerine konuldu.



Şekil 6.8. İstikamet dümeninin tamir işlemi için uçak üzerinden sökülüp yatay olarak konumlandırılması

Suyun bulunduğu bölgeyi içine alacak şekilde, SRM tarafından belirlenen ölçüde tamir yapılacak bölge belirlendi. Bu tamir alanının ölçüsü, suyun olduğu 3050 mm<sup>2</sup> olan bölgeyi içine alacak şekilde, 185 mm en 185 mm boy olacak şekilde kare biçiminde biçimde etrafı çevrildi. Şekil 6.9’ da tamir bölgesinin mm (milimetre) cinsinden uzunluk bilgisinin verildiği görülmektedir.



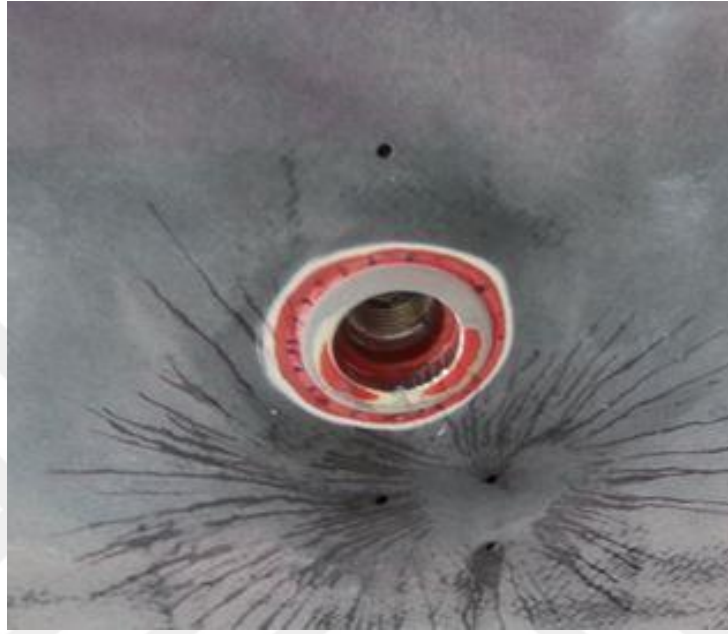
Şekil 6.9. Tamir yapılacak bölgenin ölçüleri

Şekil 6.10’ da tamir yapılacak bölgenin kare biçimde yerinin belirlendiği görülmektedir.



Şekil 6.10. Tamir yapılacak bölge kare biçiminde çerçeve içine alındı

Tamir işlemine başlamadan önce termografik inceleme yöntemi ile tespit edilen suyun, gerçekten su olup olmadığını anlamak için suyun tespit edildiği bölgeye birkaç delik açılarak numune alındı. Şekil 6.11’ de istikamet dümeninin üzerine açılan inceleme delikleri görülmektedir.

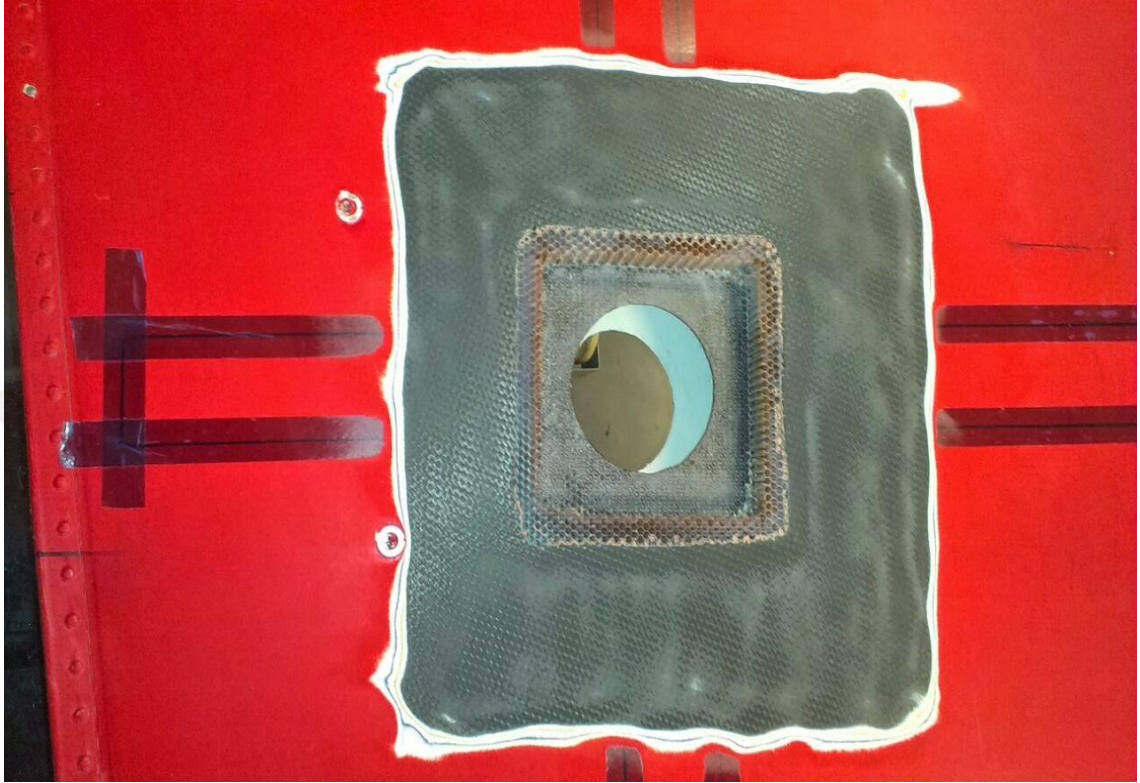


Şekil 6.11. İstikamet dümenindeki inceleme delikleri

Bu incelemenin yapılmasının sebebi suyun olduğundan kesin olarak emin olmak istenmesidir. Şekil 6.4’ te termal kamera görüntüsünde gözlemlenen koyu bölgelerin suyun dışında herhangi bir tamir kalıntısının da termal kamerada su gibi görünmesine sebebiyet verebileceğinden dolayı belli başlı noktalardan delikler delinerek numuneler alınmıştır. Alınan numunelerde de su tespit edilmiştir. Bu aşamadan sonra suyun varlığından kesin olarak emin olundu.

Şekil 6.9’ da görüldüğü üzere tamir yapılacak bölgenin alanı belirlenmişti. İstikamet dümeninin panelinde tamir edilecek bölgenin çevresi uygun temizleme sıvısı ile iyice temizlendi ve maskelendi. Tamir yapılacak alanın koruyucu katmanı söküldü. Daha sonra kompozit yapının ana bölümleri sırası ile üst yüzey, core (balpeteği yapısı) ve alt yüzey söküldü. Buna ek olarak merkez kısımdaki, askı noktasının bağlandığı yer olan bush (yatak) sökülerek çıkartıldı. Bush ve balpeteği yapının söküldüğü yerler zımparalanarak yeni malzemelerin takımına hazır hale getirildi. Şekil 6.12’ de tamir

işlemi yapılan bölgeden core, bush, üst yüzey ve alt yüzeyin çıkartılmasından sonraki hali görülmektedir.



Şekil 6.12. Tamir edilen bölgenin; üst yüzey, core, bush ve alt yüzeyin sökümü sonrası görünümü

Zımpara işleminden sonra tamir bölgesi iyi bir şekilde temizlendi. Yüzey pürüzsüzlüğünden emin olmak için test yapılır. İstenilen yüzey pürüzsüzlüğü elde edildikten sonra yeni malzemelerin montajına geçilebilir.

Bush, askı noktalarını tutturmamıza yarayan bir parçadır. Balpeteği kompozit yapıları yüksek mekanik özelliklere (basınç, eğilme, çekme ve çarpma dayanımı) sahip olmasına rağmen tabakalar arasındaki kayma gerilimine ve yanal yüklere karşı dayanıksızdırlar [33]. Bu sebeple askı noktalarına gelen yanal yükleri karşılamak için yükü metal bir yapının karşılaması istenir. Bu durum, metal bush kullanılmasının temel sebebidir. Metal bir yapı ile petekli yapının doğrudan birbirine temas etmesi de istenmeyen bir durumdur. Bu durumun önüne geçmek için metal yapı ile balpeteği yapı arasına türü epoksi olan bir malzeme kullanıldı. Bush ve petekli yapı arasına gelen bu malzeme iki malzemenin birleşmesiyle oluşmaktadır. Bunların biri epoksi diğeri ise sertleştiricidir.

Bu iki malzeme belirli oranlarda karıştırılıp yaklaşık üç saat bekleme süresinden sonra katı halini almaktadır. Yapı olarak düşük yoğunluklu, sert ve aşınabilir bir malzemedir. Aynı zamanda darbe dirençleri de oldukça yüksektir. Mavi ya da gri görünümündedirler [34]. Bush yerine takılmadan önce yukarıda bahsedilen, balpeteği yapı ile bush arasına gelecek bu koruyucu malzememizi üretmemiz gerekmektedir. Koruyucu malzememizi oluşturan iki madde karıştırılır ve uygun kalıba doldurulur. Kürlenmesi için belirli süre beklendikten sonra bush'un dışına giydirilmesi için merkez delik açıldı.

Koruyucu malzemenin hazırlığı bittikten sonra takım işlemi gerçekleştirilecek olan bush'un etrafına koruyucu malzemenin ve bush'un kendisinin de alt yüzeye yapışmasını sağlayacak uygun kimyasal sürüldü. Şekil 6.13' de takım işlemi için hazırlanmış bush görülmektedir.



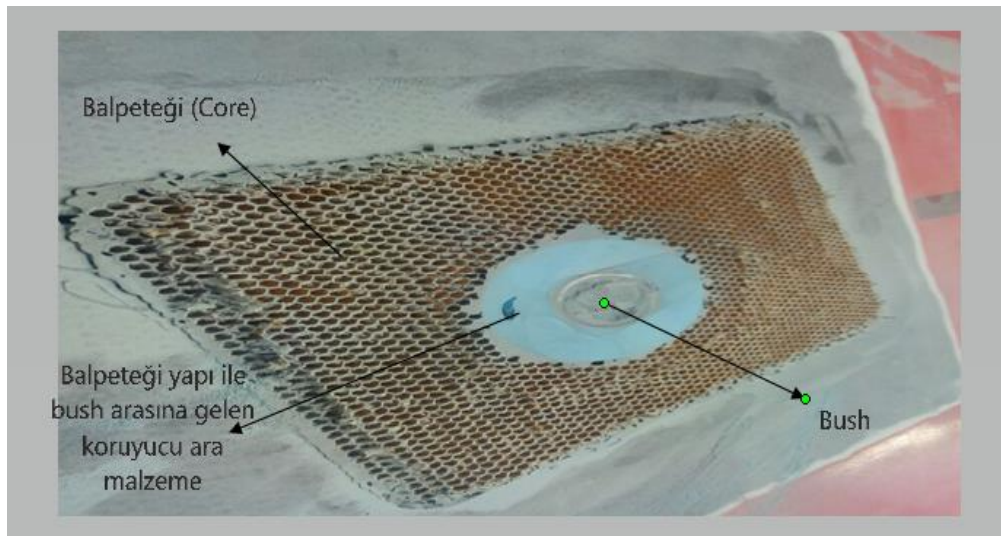
Şekil 6.13. Takım işlemi için hazırlanmış olan bush (yatak)

Tamir yapılacak bölgeye mantar kısmı altta kalacak şekilde yapının alt yüzeyinden üst yüzeyine doğru bush takıldı. Bush'un çevresine oturacak şekilde hazırlanan koruyucu malzeme giydirildi. Bush ve koruyucu malzeme birleştirildikten sonra yerine tam oturmasını ve birbirine iyi yapışmasını sağlamak amacıyla üzerine ağırlık konuldu ve yapı kür işlemi için belirli süre ve sıcaklıkta bekletildi. Şekil 6.14' te bush yerine takıldıktan sonra alttan görünüşü görülmektedir.



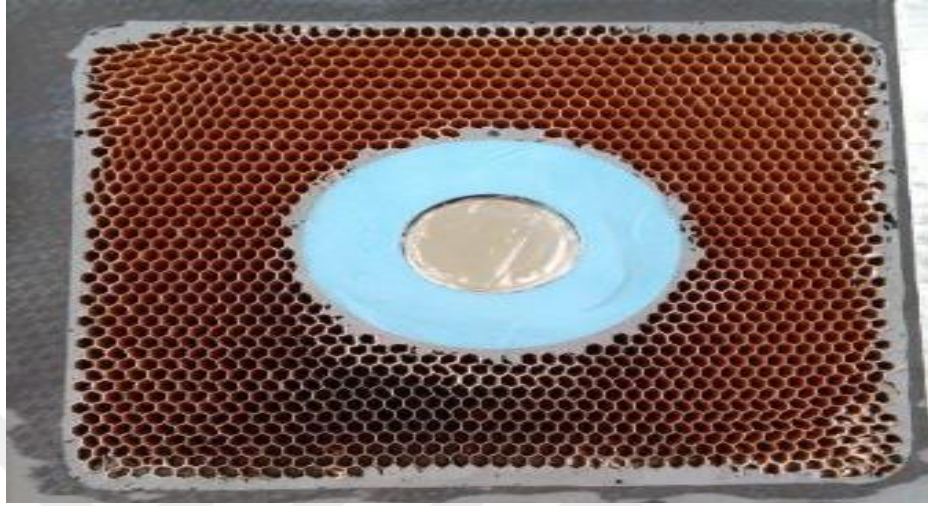
Şekil 6.14. Bush'un takım işlemi gerçekleştirildikten sonra alt yüzeyden görünüşü

Kürleme işleminin ardından kesilen bölgeye göre uygun ölçüde hazırlanmış balpeteği hücre yapısının alt yüzeye yapışmasını sağlayacak uygun yapıştırıcı kullanıldı. Aynı zamanda petekli hücre yapısı koruyucu malzemeyi çevreleyecek şekilde alt yüzeye oturtuldu. Kürleme işlemi için beklemeye alındı. Şekil 6.15' te core, balpeteği yapı ve koruyucu malzemenin olduğu bölgeler görünmektedir.



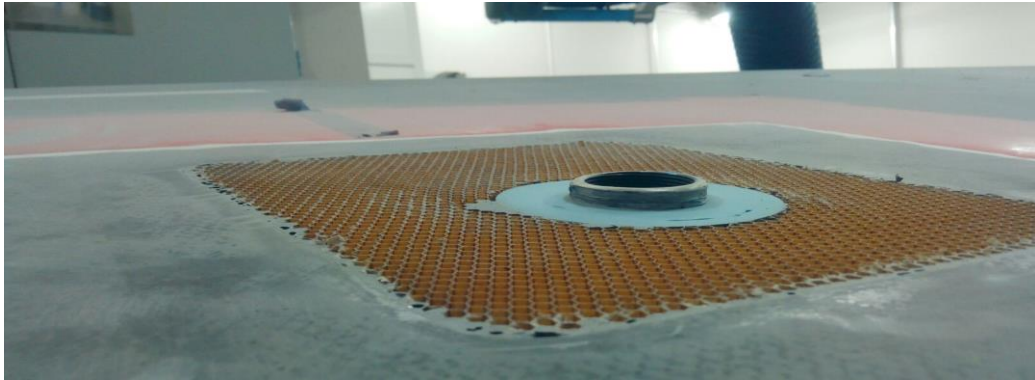
Şekil 6.15. Bush, koruyucu malzeme ve balpeteği yapının takıldıktan sonraki görünümü

Bush'un içine yabancı bir malzeme kaçmaması için bantla kapatıldı. Balpeteği yapının fazla kısmı üst yüzey referans alınarak zımparalandı. Şekil 6.16' da koruyucu malzeme ve petekli hücrelerin fazla kısımlarının zımparalandıktan sonraki hali görünmektedir.



Şekil 6.16. Koruyucu ara malzeme ve balpeteği yapının zımparalama işleminden sonra üstten görünümü

Balpeteği yapı ve koruyucu malzeme, üst katmanla eşit seviyeye gelene kadar zımparalandıktan sonra bush ile aralarında yükseklik farkı meydana geldi. Şekil 6.16 üstten görünümü olduğu için ve bush bantla kapatıldığı için yükseklik farkı tam belirgin değildir. Ayrıca vakum folyosu ile balpeteğinin yüzeyi kapatılır ve vakum torbası bağlanarak içerideki hava alınır. Şekil 6.17' de zımpara işleminden sonra bush ile diğer yapılar (core ve koruyucu malzeme) arasındaki yükselti farkı net bir şekilde görünmektedir.



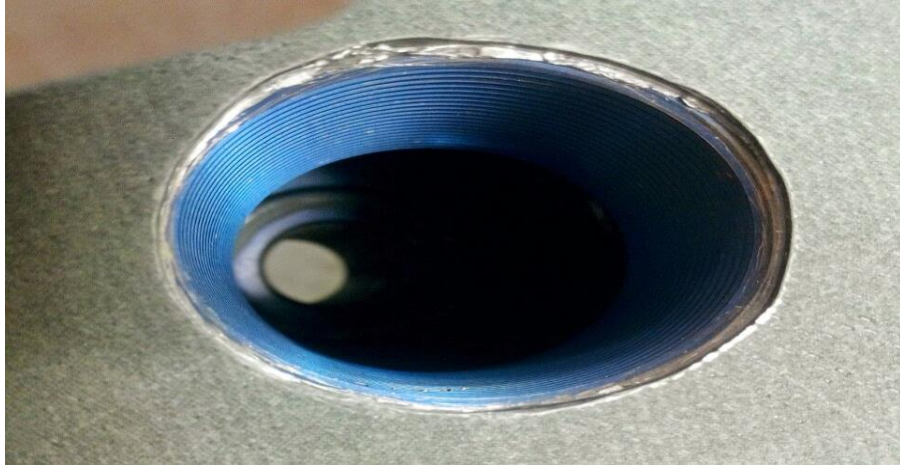
Şekil 6.17. Koruyucu ara malzeme ve balpeteği yapının zımparalama işleminden sonra oluşan yükselti farkının görünümü

Oluşan bu yükselti farkına doldurmak için, SRM referans alınarak uygun kumaşlar uygun yönlerde (karbon ve cam fiberler) altlarına reçine gelecek şekilde balpeteği yapısının üzerine yerleştirildi. Yüzey vakum torbası altında fazla reçine ve hava kalıntıları alınarak daha iyi yapışması sağlandı. Bush ile kumaşlar aynı seviyeye geldikten sonra bush'un da üzerini kaplayacak şekilde iki kat cam fiber altlarına reçine gelecek şekilde yerleştirildi. Uygun şartlar altında kürleme işlemi için bekletildi. Şekil 6.18' de tamir bölgesinin en üst kısmına 2 kat cam fiber yerleştirildikten sonraki görünümü görülmektedir.



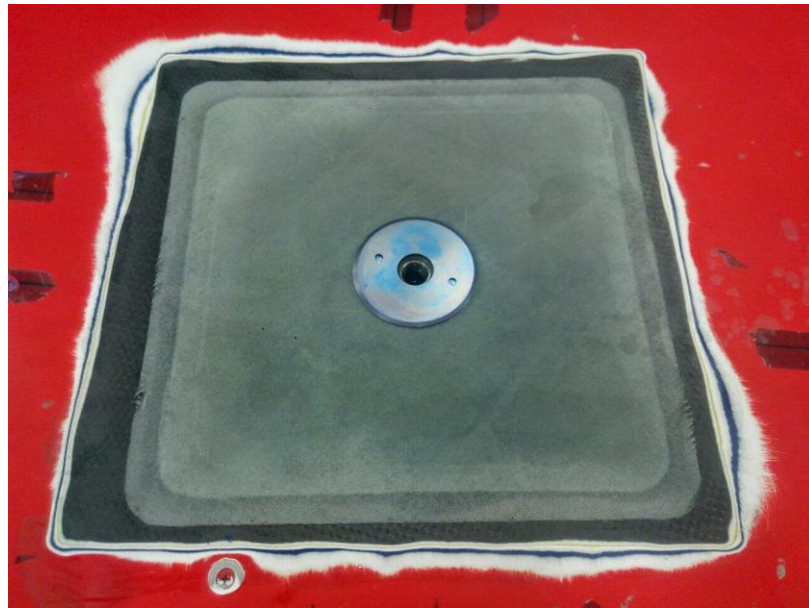
Şekil 6.18. Tamir bölgesinin üzerine son iki kat cam fiberlerin yerleştirilmesi sonrasındaki görünümü

Kürleme işleminden sonra, en son atılan iki cam fiber katları altında kalan bush'a askı noktalarının yerleştirilmesi için bush'un delik kısmını içine alınacak şekilde üzerine işaretlendi. Şekil 6.19' da görüldüğü üzere bu işaretler referans alınarak oradaki fiber yuvarlak şekilde kesilerek çıkarıldı.



Şekil 6.19. Askı noktalarının takımı için bush'un üzerini örten fiberlerin kesilip çıkartılması

Bush'un delik kısmı açıldıktan sonra, tamir bölgesinin alt ve üst yüzeyine askı noktası bush'larının takım işlemine başlandı. Askı noktası bushları, merkezde bulunan bush'un üzerine takmadan hemen önce bu iki malzemenin birbirine temas edeceği bölgelere yapışmasını sağlayacak uygun yapıştırıcı malzeme sürüldü. Askı noktası bushları, yapıştırıcı malzeme kurumadan ve yüzeye tamamen oturana kadar çevrilerek takıldı. Takım işlemi bitmesinin ardından kütleme işlemi için beklendi. Şekil 6.20' de merkez bush üzerine askı noktası bush'un takıldığı görülmektedir.

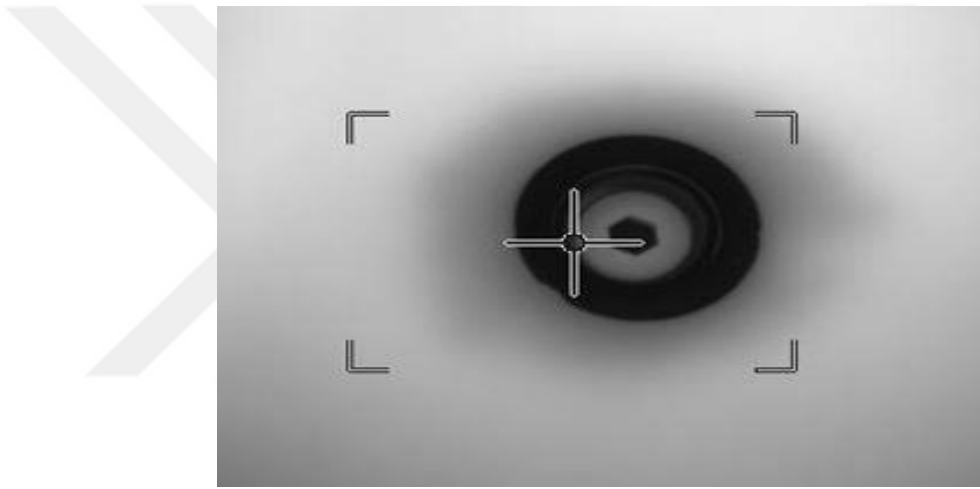


Şekil 6.20. Tamir bölgesinin merkezindeki bush'un üzerine askı noktası bush'larının takılması sonrası görünümü

Askı noktası bush'larının takımından sonra üst yüzeye gerekli yüzey koruması yapıldı. Son olarak istikamet dümeninin eski boyası ile aynı olacak şekilde boyandı. Bu işlem ardından tamir işlemi tamamlanmıştır.

### 6.3. Tamir İşlemi Sonrasında Kontrol Amaçlı Yapılan Termografik Muayene

Tamir işleminin başarıyla gerçekleşip gerçekleşmediğini kontrol etmek amacıyla tamir işleminin uygulandığı bölgeye tekrar termografik inceleme yapıldı. Şekil 6.21' de tamir işleminden sonra tekrar yapıyı kontrol etmek amacıyla termografik muayenenin yapıldığı görülmektedir.



Şekil 6.21. Tamir işlemi sonrasında kontrol amaçlı yapılan termografik inceleme sonucu oluşan termal görüntü

Termal görüntü incelendiğinde herhangi bir su belirtisine rastlanmamıştır. Tamir işleminden önce yapılan termografi sonucunda Şekil 6.4'te askı noktasının çevresinde su tespit edilmişti. Şekil 6.4 ile Şekil 6.21' deki termal görüntüler karşılaştırıldı. Daha önce Şekil 6.4'te tespit edilen suyun tamamının giderildiği Şekil 6.21' deki termal görüntüde net bir şekilde görülmektedir. Buda tamir işleminin başarıyla gerçekleştirildiğini göstermektedir.

## 7. BÖLÜM

### SONUÇ ve ÖNERİLER

#### 7.1. Sonuç

Uçağın ana kontrol yüzeylerinden birisi olan istikamet dümeni, uçuşun emniyetli bir şekilde gerçekleşmesini sağlayan oldukça önemli yapılardan bir tanesidir. İstikamet dümeni içerisine hapsolan su zamanla birikerek artar. Bunun sonucunda balpeteği yapı zaman içerisinde hasara uğrayabilir. Bu çalışmada, yapı hasara uğramadan suyun fark edilmesini sağlamak amacıyla termografik muayene kullanıldı.

Uçak üzerinde bulunan irtifa dümeni ve istikamet dümeni, balpeteği hücrelerden oluşur. Bu yapıların termografik kontrolü planlanmış bir şekilde beş senede bir yapılır. Periyodik inceleme zamanı gelmiş bir istikamet dümenine, su olup olmadığını kontrol etmek amacıyla termografik inceleme yapıldı. Yapılan termografik inceleme sonucunda istikamet dümeni sağ yüzeyindeki 2 ve 3 numaralı askı noktalarında ve sol yüzeyindeki 3 numaralı askı noktasında su tespit edildi. Sağ yüzeydeki askı noktalarında tespit edilen suyun alanı  $3000 \text{ mm}^2$  den daha küçük bir değerde olduğu için tamir işlemi uygulanmadı. Tamir işlemi uygulanmayan istikamet dümeninin sağ yüzeyindeki 2 ve 3 numaralı askı noktaları için su miktarının takibi yapılmak üzere ilerleyen zamanlarda termografik muayene planlandı.

Sol yüzeydeki askı noktasında bulunan suyun alanı  $3000 \text{ mm}^2$  den daha yüksek bir değerde olduğu için bu bölgeye tamir işlemi uygulanmasına karar verildi. Tamir işleminin uygulanabilmesi için istikamet dümeninin yatay konuma getirilmesi gerekir. Bu sebeple istikamet dümeni uçak üzerinden söküldü ve yatay konuma getirildi. Yapılan bu tamir üretici firma tarafından belirlenen adımlara göre uygulanan oldukça özel bir tamirdir.

Tamir işleminin ardından bu sürecin başarılı geçip geçmediğini öğrenebilmek amacıyla tekrar termografik muayene yapıldı. Kontrol amaçlı yapılan bu muayene sonucunda

hiçbir su belirtisine rastlanmadı. Şekil 6.4 (tamir uygulanmadan önceki termal kamera görüntüsü) ile Şekil 6.21 (tamir işlemi uygulandıktan sonraki termal kamera görüntüsü) karşılaştırıldığında suyun tamamen giderildiği daha net bir şekilde görülmektedir.

## 7.2. Öneriler

Bu çalışmada yapılan incelemenin kalitesini daha da yukarıya taşımak için bir takım öneriler gözlemlenmiştir. Bunlar sıralanacak olursa;

- Termal kamera cihazlarının geliştirilmesi sonucu daha kesin sonuçlar elde edilebilir.
- Sürekli nemli bölgelere uçuş yapan uçakların planlanan termografik inceleme sıklığı arttırılabilir. Yani normalde beş yılda bir inceleme oluyor iken daha erken inceleme gerçekleştirilmesi kaliteyi daha da arttıracığı düşünülmüştür.

## KAYNAKÇA

- [1] CIBA1 Composites, “Honeycomb Sandwich Design Technology”, Publication No: AGU 223, Duxford, U.K., 1995.
- [2] Bekem, A., Ercan, H., Doğu, M., Ünal, A., Uçak sanayiinde kullanılan balpeteği kompozitlerin mekanik davranışlarının incelenmesi, **6th International Advanced Technologies Symposium**, Elazığ/Türkiye, 2011.
- [3] <http://www.plascore.com/honeycomb-cores.htm>, (Erişim Tarihi: Şubat 2017)
- [4] <http://www.universalcert.com/hizmetler/tahribatsiz-muayene>, (Erişim Tarihi: Aralık 2017)
- [5] Türker, M., 2003. Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynaklı Bağlantılarının Ultrasonik Muayenesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 93 s.
- [6] <http://docplayer.biz.tr/736891-Tahribatsiz-muayene-yontemleri.html> (Erişim Tarihi: Aralık 2017)
- [7] Kafalı, H., Tanatmış, A., 2004. “Uçak bakımında yaygın olarak kullanılan hasarsız kontrol yöntemleri”, **Kayseri V. Havacılık Sempozyumu**, Kayseri, 314-318.
- [8] Armatlı, Kayrak, M., 2012. “Uçak bakımında darbe hasarının tahribatsız kontrolü” **TMMOB MMO Makine ve Mühendis**, **53** (629): 35-39.
- [9] Topuz, A., 1993 .“Tahribatsız Muayeneler”, **Fatih Gençlik Vakfı Matbaa**, Sayı: 281, İstanbul.
- [10] Soluk, E., 2003. Infrared Ölçümleme ile Isı Trasferi İncelemesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 73 s.
- [11] Arslan, M., 2011. Bir Yüzeyinden Isıtılan Düzlemsel Malzemenin Kızılötesi Termografi ve Görüntü İşleme Teknikleri ile Tahribatsız Muayenesi İçin Yeni Bir Sistem, Kırıkkale Üniversitesi, Doktora Tezi, Kırıkkale, 108 s.

- [12] Çobanoğlu, M., 2012. Dijital Radyografi Kullanılarak Teğet Tekniği ile Çelik Borularda Cidar Kalınlığı Tahmini, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 97 s.
- [13] Bekem, A., Ercan, H., Doğu, M., Ünal, A., 2011. Uçak sanayiinde kullanılan balpeteği kompozitlerin tahribatsız muayeneleri ve tamiri, 6th **International Advanced Technolgies Symposium**, Elazığ/Turkey.
- [14] Değirmenci, S., Şirin, B., 2001. Otomotiv Sanayii için Döküm Parça Üreten Demir Döküm Fabrikalarında Tahribatsız Muayenenin Önemi ve Uygulamaları. **2.Uluslararası Döküm Kongresi**, İstanbul, s.96-109
- [15] <http://wellden.mx/en/category/pt/>, (Erişim Tarihi: Mart 2018)
- [16] Günay, Y., Değirmenci, S., Şirin, B., 2003. Magnetik Parçacık Yöntemi ile Dökme Demirlerde Çatlak Oluşum Mekanizmalarının İncelenmesi. **2. Uluslararası NDT Sempozyumu ve Sergisi**, İstanbul, s. 171-178
- [17] Ercan H., 2006. Uçak Sanayinde Kullanılan Balpeteği Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul, s.200
- [18] Halmshaw, R. 1991. Non-destructive Testing. E.Arlond Press, London, s.320
- [19] <http://demo.hascelik.com/tr/celik-hakkinda/girdap-akimlari-eddy-current-yontemi/87> (Erişim Tarihi: Nisan 2018)
- [20] <http://www.flight-mechanic.com/composite-honeycomb-sandwich-repairs/> (Erişim Tarihi: Nisan 2018)
- [21] Maldague, X., 1993. Nondestructive Evaluation of Metarials by Infrared Thermography. London, Springer Verlag, 203 s.
- [22] Tmiri, A., Sahnoun, S., 2002. Thermal Non Destructive Testing in the Frequency Domain. **8<sup>th</sup> European Conference on NDT (ECNDT Conference)**, Barcelona, s.283-294

- [23] Yılmaz, A., O., 2002. Infrared Yöntemle Termal Deşarj İncelemesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 104s.
- [24] Szabra, D., Swiderski, W., 2002. Infrared Thermographic Detection of Destruction Area in Composite Armours. **Mezinarodni Conference Pyrotechniku**, Luhacovice, s.127-132
- [25] <http://adlbelge.com/termal-kameralarin-fiyatlari-ozellikleri-goruntuleri> (Erişim Tarihi: Nisan 2018)
- [26] <http://ultralifi.com/2015/06/26/gorunur-isikla-haberlesme-vlc-nedir/> (Erişim Tarihi: Nisan 2018)
- [27] Aydın, O., 2017. Aşırı Selenyum Katkılı Siyah Silisyum Görünür ve Kızılötesi Dedektörlerin Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 122s.
- [28] <http://rasyonalist.org/yazi/elektromanyetik-dalgalar-radyo-dalgaları/> (Erişim Tarihi: Mayıs 2018)
- [29] Varkal, D., 2017. Bazı Tiyazol Bileşiklerinin Morötesi Spektroskopisini Kullanarak Deneysel ve Kuramsal İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 70s.
- [30] Tolluoğlu, A.O., Kargın, S., Uçan, O.N., Kent, S., 2005. Hücresel Yapay Sinir Ağları ile Kızılötesi Görüntülerde Gürültünün Temizlenmesi. **Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi (2)1**: 77-86
- [31] [https://www.niar.wichita.edu/niarworkshops/Portals/0/Wednesday\\_945\\_Thevenin.pdf](https://www.niar.wichita.edu/niarworkshops/Portals/0/Wednesday_945_Thevenin.pdf) (Erişim Tarihi: Mayıs 2018)
- [32] <https://www.plascore.com/honeycomb/honeycomb-panels/> (Erişim Tarihi: Mayıs 2018)
- [33] Akkuş, H., Düzcükoğlu, H., Şahin, Ö.Ş., 2016. Alüminyum balpeteği yapılarında darbe mukavemeti tahmini için regresyon modeli oluşturulması. **Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 9(3): 102-111

- [34] <https://multimedia.3m.com/mws/media/458644O/3mtm-scotch-weldtm-void-filling-edge-seal-compound-ec-3524.pdf> (Erişim Tarihi: Haziran 2018)
- [35] Maldague, X., Moore, P., 2001. Nondestructive Testing Handbook: Infrared and Thermal Testing. American Society for Nondestructive Testing, Columbus, 732s.
- [36] Wolfe, W.L., Zissis, G.J., 1993. The Infrared Handbook. Environmental Research Institute of Michigan, Washington, 1765s.
- [37] Maldague, X., 1994. Infrared Methodology and Technology. Gordon and Beach Science Publishers, Langhorne, 320s.
- [38] Rybicki, G., Lightman, A.P., 1979. Radiative Processes in Astrophysics. New York: Wiley-Interscience, pp.3-4 and 20-23.
- [39] <http://bilgioloji.com/pages/fen/fizik/kuantum/planck-sabiti-ve-formulu-nedir/> (Erişim Tarihi: Haziran 2018)
- [40] <http://bilgioloji.com/pages/fen/fizik/kuantum/wien-kayma-yasasi-nedir/> (Erişim Tarihi: Haziran 2018)
- [41] Avdelidis, N.P., Moropoulou, A., 2004. Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. **Journal of Culturel Heritage**, 5: 119-127
- [42] Avdelidis, N.P., Hawtin, B.C., Almond, D.P., 2003. Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites. **NDT & E International**, 6: 433-439
- [43] Summerscales, J., 1987. Nondestructive Testing of Fibre-Reinforced Plastics Composites, Elsevier Applied Science Publishers, Plymouth, s.497
- [44] <http://www.visirx.com/en/infrared-thermography-technology> (Erişim Tarihi: Aralık 2017)
- [45] [https://www.researchgate.net/figure/259558221\\_Figure-3-Typical-setup-for-optical-pulsed-thermography](https://www.researchgate.net/figure/259558221_Figure-3-Typical-setup-for-optical-pulsed-thermography) (Erişim Tarihi: Aralık 2017)

- [46] Almond, D.P., Peng, W., 2001. Thermal imaging of composites. **Journal of Microscopy**, 2: 163-170
- [47] Maldague, X., Marinetti, S., 1996. Pulsed phase infrared thermography. **Journal of Applied Physics**, 5: 2694-2698
- [48] Maldague, X., Applications of Infrared Thermography in Nondestructive Evaluation, (Web Sayfası : [http://w3.gel.ulaval.ca/~maldagx/r\\_1123.pdf](http://w3.gel.ulaval.ca/~maldagx/r_1123.pdf)), (Erişim Tarihi: Mart 2018)
- [49] Wu, D., Zweschper, Th., Salerno, A., Busse, G., Lock-in Thermography for Nondestructive Evaluation of Aerospace Structures. (Web Sayfası : <https://www.ndt.net/article/ecndt98/aero/018/018.htm>), (Erişim Tarihi: Mart 2018)
- [50] Kumar, S.S., Kumar, M.R., Sudheendra, H.N., Sathish, R., 2011. Pulse Phase Thermographic Non-Destructive Evaluation of Composite Aircraft Structures. **Insight- Non-Destructive Testing and Condition Monitoring**, 6: 312-315
- [51] Maldague, X., 2001. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. A Wiley-Interscience Publication, New York, 704s.
- [52] <http://www.sanpaelektronik.com/index.php/tr/bilgiler/item/512-termal-kamera-nedir> (Erişim Tarihi: Nisan 2018)
- [53] <https://burakveelif.com/havacilik/bilgiler/106-hareketli-ana-kumanda-yuezeyleri.html> (Erişim Tarihi: Mart 2018)
- [54] <https://kids.britannica.com/students/article/airplane/272759/196031-toc> (Erişim Tarihi: Mart 2018)
- [55] Bilgi, C., 2014. Bazı Uçaklarda Kullanılan AL 2024 Alaşımlarında ve Karbon Fiber Kompozitlerinde Termografi Yönteminin Uygulanabilirliğinin DeneySEL İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, 58s.

- [56] [http://kisi.deu.edu.tr/mehmet.zor/composite%20materials/2-Genel\\_bilgiler.pdf](http://kisi.deu.edu.tr/mehmet.zor/composite%20materials/2-Genel_bilgiler.pdf) (Erişim Tarihi: Haziran 2018)
- [57] <https://uk.rs-online.com/web/p/heat-guns/8741147/> (Erişim Tarihi: Haziran 2018)
- [58] <https://www.labor.com.tr/FLIR-T335-TERMAL-KAMERA,PR-6687.html> (Erişim Tarihi: Haziran 2018)



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı:** Kadir Münir Ercümen  
**Uyruğu:** Türkiye  
**Doğum Tarihi ve Yeri:** 20.03.1993 - İskenderun  
**Medeni Durum:** Bekâr  
**E-mail:** [kadirercumen@gmail.com](mailto:kadirercumen@gmail.com)  
**Tel:** 0538 598 12 36  
**Yazışma Adresi:** Cumhuriyet Mahallesi, Gaziosmanpaşa Caddesi, Apartman  
No:19, Daire:16 Çayırova/KOCAELİ

### EĞİTİM

| Derece        | Kurum                                              | Mezuniyet Tarihi |
|---------------|----------------------------------------------------|------------------|
| Yüksek Lisans | Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü      | 2018             |
| Lisans        | Erciyes Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksek Okulu | 2016             |
| Lise          | İskenderun Cumhuriyet Anadolu Lisesi, Hatay        | 2010             |

### İŞ DENEYİMLERİ

| Yıl        | Kurum           | Görev                 |
|------------|-----------------|-----------------------|
| 2016-Halen | THY Teknik A.Ş. | Uçak Bakım Teknisyeni |

### YABANCI DİL

İngilizce