

Uçak Kompozit Yapılarında Termografik Analiz ile Tahribatsız Muayene

Ersin Eroğlu

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Aralık 2019

Non-Destructive Testing by Means of Thermographic Analysis in
Aircraft Composite Structures

Ersin Eroğlu

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Aeronautical Science and Technologies

December 2019

Uçak Kompozit Yapılarında Termografik Analiz ile Tahribatsız Muayene

Ersin Eroğlu

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN

Aralık 2019

ONAY

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Ersin EROĞLU'nun YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Uçak Kompozit Yapılarında Termografik Analiz ile Tahribatsız Muayene" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir

Danışman: Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Selim GÜRGEN

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN

Üye: Prof.Dr. Kürşad Melih GÜLEREN

Üye: Doç.Dr. Mustafa Özgür ÖTEYAKA

Üye:

Üye:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN ve Dr. Öğr. Üyesi Selim GÜRGEN danışmanlığında hazırlamış olduğum “Uçak Kompozit Yapılarında Termografik Analiz ile Tahribatsız Muayene” başlıklı tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.30/12/2019

Ersin EROĞLU

ÖZET

Yeni nesil hava araçları ile beraber kompozit malzeme kullanımının havacılıkta kullanım oranı her geçen gün artmaktadır. Kompozit Malzemelerin kullanımı arttıkça bu malzemelerin üretim sonrası ve servis ömürleri boyunca tahribatsız olarak kontrol edilmesi ihtiyacı doğmuştur. Bu kontrol yöntemlerinden bir tanesi olan termografik analiz yönteminin temel prensiplerinin araştırılması ve örnek uçak malzemeleri üzerinde deneysel bir çalışma yapılması amaçlanmıştır.

Uçak kompozit malzemelerinin tahribatsız kontrol yöntemleri araştırılmış ve özel bir yöntem olan termografik kontrol yöntemi bu çalışmada çalışılmıştır. Araştırmada öncelikle termografik analizinde kullanılan parametreler belirlenmiş ve bu parametrelere dikkat alınarak farklı uçak yapılarında kullanılan kompozit ham malzemelerinden imal edilen kontrol parçaları incelenmiştir.

Araştırma sonucunda havacılıkta kullanılan kompozit malzemelerden önceden reçine emdirilmiş cam elyafı malzemedeki katmanlı kompozit malzemeleri incelenmiştir. Farklı hata tipleri benzetimi yapılarak, termografik olarak tespit edilmiştir. Termografik analizde önemi kriterlerden biri olan ısı kaynağı seçimi ve uygulaması zor olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak çok hızlı bir şekilde malzemeler kontrol edilmesi avantaj sağlamaktadır. Hata tespit edilen bölgedeki hassasiyet düşük olmakla beraber, ikinci bir kontrol yöntemi ile tam teşhis yapılmaktadır.

Yapılan testlerden elde edilen sonuçlarda uçak yapılarında termografik analizin kullanılabilirliği incelenmiştir. Gerçek bir uçak yapısının kontrol edilebileceği belirlenmiştir. Bir uçak parçasının incelenebileceği ve termografik testler için referans malzemelerin üretilebileceği ve bu malzeme için prosedürlerin önceden değerlendirilebileceği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Uçak, Kompozit Malzeme, Tahribatsız Muayene, Tahribatsız Muayene Değerlendirmesi, Termal analiz, Termografi, Termalradyografi

SUMMARY

With the new generation of air vehicles, the use of composite materials in aviation is increasing every day. As the use of composite materials increased, the need for non-destructive control of these materials arose throughout their production and service life. It is aimed to investigate the basic principles of thermographic analysis, one of these control methods, and to conduct an experimental study on sample aircraft materials.

Non-destructive control methods of aircraft composite materials have been investigated and a special method, thermographic control method, has been studied in this study. As a research method, parameters used in thermographic analysis were determined and control parts manufactured from composite raw materials used in different aircraft structures were examined by taking care of these parameters.

As a result of the research, layered composite materials from pre-impregnated glass fiber material were examined from composite materials used in aviation. Different error types were simulated and determined thermographically. One of the criteria of importance in thermographic analysis, the selection of heat source and its application were found to be difficult. In general, materials are tested very quickly provides an advantage. Although the sensitivity in the area where the error is detected is low, full diagnosis is made with a second control method.

The usability of the thermographic analysis in aircraft structures was examined in the results from the tests carried out. The inspectability of an actual aircraft structure has been determined. It was determined that an aircraft part could be examined and reference materials could be manufactured for thermographic testing and procedures could be prepared for this material.

Keywords: Composite Material Nondestructive testing, Nondestructive evaluation, Thermal-radiography, Thermography,

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda, konu, yöntem ve test konusunda nitelikli bir çalışma olması için yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Dr. Seyid Fehmi DİLDEMİZ'e, çalışmanın hazırlanması sırasında desteğini esirgemeyen danışman hocalarım Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN, Dr. Öğr.Üyesi Selim GÜRGEN'e, kompozit test numunelerin üretiminde yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Ayhan GÖKYER'e, eğitim hayatım boyunca beni daha fazlası için cesaretlendiren annem Nurcihan EROĞLU ve babam Yusuf EROĞLU'na, hayatımın her alanında olduğu gibi bu çalışmamda da her zaman yanımda olan ve motive eden eşim Zehra EROĞLU ve oğlum Yusuf Mete EROĞLU'a en içten duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
3. TEORİK BİLGİ	11
3.1 Termografinin Tanımı.....	11
3.2. Termal Sınıflandırma	12
3.3 Termal Uyarma Yöntemleri.....	14
3.4 Tekniğin Hassasiyeti.....	14
3.4.1 Uyarma parametreleri	15
3.4.2 Malzeme özellikleri.....	15
3.4.3 Dış özellikler	16
3.5 Termografik Kamera Sistemleri	18
3.5.1 Genel	18
3.5.2 Termografik kamera.....	19
4. MATERYAL VE YÖNTEM	22
4.1. Araştırma Yöntemi	22
4.2. Evren ve Örneklem/Çalışma Grubu.....	25
4.2.1. Örnek ham malzemelerin seçilmesi	25
4.2.2. Test parçalarının üretim yönteminin seçilmesi	29
4.2.2.1 <u>El yatırması yöntemi</u>	29
4.2.2.2 <u>Vakum torbası yöntemi</u>	30
4.2.2.3. <u>Otoklav yöntemi</u>	33
4.2.3. Test parçaları için hata/hasar tiplerinin belirlenmesi	36
4.2.4. Test parçalarının üretilmesi.....	36
4.3. Veri Toplama Araçları	50

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.3.1. Termal kamera	50
4.3.2. Isı kaynağı, ısı plakası.....	53
4.3.3. Bilgisayar ve yazılım.	53
4.3.4. Yardımcı ekipmanlar.....	55
4.4. Verilerin Toplanması	55
4. 5. Verilerin Çözümlemesi	64
4.5.1 Birinci test parçasının termografik incelenmesi.....	64
4.5.2 İkinci test parçasının termografik incelenmesi	64
4.5.3 Üçüncü test parçasının termografik incelenmesi	65
4.5.4 Dördüncü test parçasının termografik incelenmesi.....	65
4.5.5 Beşinci test parçasının termografik incelenmesi.....	66
4.5.6 Altıncı test parçasının termografik incelenmesi.....	66
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	68
5.1. Veri Toplama Araçlarındaki Bulgular	68
5.1.1 Termal kamera	68
5.1.2 Isıtıcılar	68
5.1.3 Bilgisayar	69
5.2. Termografik Kontroldeki Bulgular	69
5.3. Tartışma	70
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	73
6.1. Sonuç	73
6.2. Öneriler	74
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Sivil Havacılıkta Termografi Kullanımı.....	9
3.1. Tipik Kompozit Kusurları	11
3.2. Termal Radyasyon Türleri.....	12
3.3. Çeşitli Sıcaklıklardaki Spektral Emisyon Örneği	13
3.4. Elektromanyetik Radyasyon Spektrumu	13
3.5. Isı Yayılımı Nedeniyle Etkiler	15
3.6. Yayılmayı etkileyen yüzey durumu örneği	16
3.7. Gözlem açısına yayılmanın bağımlılığı	17
3.8. Termal Kamera Örneği	19
4.1. 8H Saten dokuma	27
4.2. El Yatırması Yöntemi	29
4.3. Vakum Çantası Yöntemi	31
4.4. Vakum Torbası Yöntemi 2	31
4.5. Vakum Çantası Yöntemi 3	32
4.6. Otoklav Yöntemi	33
4.7. Otoklavda tipik pişme/kür çevirimi	34
4.8. Örnek Otoklav Fırını	35
4.9. Otoklav içine girecek vakum çantası yapılmış havacılık parçası	35
4.10. Kompozit İmalatı için Kalıp Malzemesi	37
4.11. Kesilmiş Önceden Reçine Emdirilmiş Cam Elyafı Malzemesi.....	37
4.12. Katmanlı olarak prepreg malzeme yerleştirilmesi.....	38
4.13. Tüm test parçalarının katmanlı olarak yerleştirilmesi	38
4.14. Katmanlı imalat üzerine sıyırma katmanının yerleştirilmesi.....	39
4.15. Sıyırma katmanı yerleştirilmesi.....	40
4.16. Havalandırıcı Keçesi ve Sızdırmazlık Bandı uygulaması	41
4.17. Vakum Naylonu uygulaması	41
4.18. Vakum uygulaması	42
4.19. Otoklav fırınına yerleştirilmiş vakum çantasındaki test malzemeleri	43
4.20 Kür döngüsü sonrası vakum çantasındaki test parçaları.....	43
4.21. Kürlendirilmiş test parçaları	44

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.22. Kürlenendirilmiş birinci test parçası	44
4.23. İkinci test parçasının üretim aşaması.....	45
4.24. Kürlenendirilmiş ikinci test parçası.....	45
4.25. Üçüncü test parçasının üretim aşaması.....	46
4.26. Kürlenendirilmiş üçüncü test parçası	46
4.27. Dördüncü test parçası üretim aşaması	47
4.28. Kürlenendirilmiş dördüncü test parçası.....	47
4.29. Beşinci test parçasının üretim aşaması	48
4.30. Kürlenendirilmiş beşinci test parçası	48
4.31. Altıncı test parçasının üretim aşaması	49
4.32. Kürlenendirilmiş altıncı test parçası.....	49
4.33. Optris PI 400 Termal Kamera	51
4.34. Isı plakası.....	53
4.35. Dell N3010 Dizüstü Bilgisayar	53
4.36. Optris PI Connect Yazılım Arayüzü.....	54
4.37. Test Düzeneği	55
4.38. Birinci Test Parçası Termografik 1. Kontrolü.....	56
4.39. Birinci Test Parçası Termografik 2. Kontrolü.....	57
4.40. Birinci Test Parçası Ultrasonik Kontrolü	57
4.41. İkinci Test Parçasının Termografik 1. Kontrolü.....	58
4.42. İkinci Test Parçasının Termografik 2. Kontrolü.....	58
4.43. İkinci Test Parçasının Termografik 3. Kontrolü.....	58
4.44. Üçüncü Test Parçasının Termografik 1. Kontrolü.....	59
4.45. Üçüncü Test Parçasının Termografik 2. Kontrolü.....	59
4.46. Dördüncü Test Parçası Termografik 1. Kontrolü	60
4.47. Dördüncü Test Parçası Termografik 2. Kontrolü	60
4.48. Beşinci Test Parçası Termografik 1. Kontrolü	61
4.49. Beşinci Test Parçası Termografik 2. Kontrolü	61
4.50. Beşinci Test Parçası Termografik 3. Kontrolü	61
4.51. Altıncı Test Parçası Termografik 1. Kontrolü.....	62

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.52. Altıncı Test Parçası Termografik 2. Kontrolü	62
4.53. Altıncı Test Parçası Termografik 3. Kontrolü	63
4.54. Altıncı Test Parçası Ultrasonik Kontrolü	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: Karşılaştırmalı tahribatsız muayene yöntemleri (Baylan, 2019).....	5
4.1. 7781 Stil cam dokuma özellikleri.....	26
4.2. Ağırlık olarak cam birleşimi.....	27
4.3. Basit cam iplik teli.....	28
4.4. FED-STD-209E Havadaki partikül temizlik sınıfları.....	36
4.5. Optris PI 400 Termal Kamera Teknik Verileri (Optris GmbH, 2019).....	52
4.6. Dell N3010 Teknik Özellikleri.....	54

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

k_x, k_y ve k_z

ρ

c

u'''

$\alpha = \frac{k}{\rho c}$

$e = \sqrt{k\rho c}$

$\Delta T_{surface}(t)$

Açıklama

Üç ana yönde termal iletkenliği. ($W.m^{-1}.K^{-1}$)

Malzeme yoğunluğu (kg/m^3)

Özgül ısı ($Cal/g.C^\circ$)

Birim hacim başına üretilen ısı oranı

Malzemenin kalınlığı boyunca termal yayıcı

Malzemenin termal duyarlılığı

Yüzeyin sıcaklığındaki farkı ($^\circ C$)

Kısaltmalar

NDI

NDE

NDT

TRK

TR

PT

SH

LT

VT

Prepreg

PPT

Açıklama

Non-destructive inspection, Tahribatsız muayene

Non-destructive evaluation, tahribatsız değerlendirme

Non-destructive testing, tahribatsız kontrol

Termografik kontrol/Termoradyografik kontrol

Termografi/Termoradyografi

Pulsed thermography, Darbeli termografi

Step heating, Kademeli ısıtma

Lock-in thermography, Kilitli termografi

Vibro-thermography, Vibro-termografi

Pre-impregnated, önceden reçine emdirilmiş

Pulse Phase Thermography, nabız faz termografisi

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Mühendislik malzemelerinin gelişimi havacılık malzemeleriyle beraber büyük bir hız kazanmıştır. Havacılıktaki yüksek mukavemet, ısı dayanım, elektriksel iletkenlik ve hafiflik gibi koşullardan dolayı kompozit malzemelerin kullanımını her geçen gün artmaktadır.

Wright kardeşlerin ilk uçakla uçuşundan sonra ortak bir ulaşım aracı haline gelen uçaklarda kullanılan malzemeler her zaman uçağın evrimleşmesine neden olmuştur. Ahşap-tan metale, metalden kompozitlere giderek daha hafif, yüksek sıcaklık kararlılığı ve korozyon direnci özellikleri arayan önemli bir parametre olmuştur. Özellikle, ağırlık /dayanım oranı her zaman uçak teknolojisinde büyük bir endişe faktörü olmuştur. (Carosena vd., 2017)

Kompozit malzemeler uçaklarda on yıllardır kullanılmaktadır. Ahşap lamine malzemeler, destek ve kumaş yüzeyleri, eski nesil uçaklarda bulunan en eski formlardan bazılarıdır. Günümüzde karbon elyaf takviyeli plastikler (CFRP) ve bal peteği malzemeleri gibi ileri kompozitler, çeşitli yapısal havacılık uygulamalarında giderek daha fazla kullanılmaktadır. Kompozit yapılar, hava taşımacılığında genel havacılığa kadar değişen modern uçak tasarımlarında bulunur. Bakım onarım teknolojisi, her orijinal ekipman üreticisi ve uçak tipine göre değişir. (Anish vd., 2016)

Bununla birlikte, kompozit yapılar, işleme ve üretim aşamaları sırasında servis/hizmet esnasında oluşabilecek hasara meyillidir. Kompozit bileşenlerin zarar görmesi, yalnızca görsel kontrol ile tespit edilemeyebilir. Bu nedenle, bu hasarları belirlemek, hasarlı alanı onarmak, onarımları incelemek ve uçak bileşenindeki yapısal bütünlüğü yeniden sağlamak kritik hale gelir. Günümüzde, tamir edilen uçak yapısal bileşenlerinde hasarların derecesini belirlemek, karakterize etmek ve değerlendirmek için çeşitli tahribatsız muayene yöntemleri uygulanmaktadır.

Kompozit malzemelerin üretim yönteminin klasik üretim yöntemlerden farklı olması ve havacılıkta güvenlik gereksinimlerinden dolayı belirli periyotlarda ve sürekli kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu kontrol yöntemleri çeşitli olmakla beraber hepsinin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Kompozit uçak parçası üretim aşamasında parça ile beraber

üretileen asıl parçadaki kompozit yapıyı simüle eden/benzetim yapılan test malzemeleri tahribatlı kontrol edilirken, asıl parçalar tahribatsız olarak kontrol edilir. Kompozit malzemelerin servis ömürleri boyunca ise, periyodik olarak tahribatsız olarak kontrol edilme ihtiyacı vardır. Tahribatsız kontrol yöntemleri görsel veya optik, girdap akımları, penetran veya nüfusiyet, ultrasonik ve radyografik kontrol olarak 5 ana branşta incelenmektedir. Bu yöntemlerin kullanım yerleri ve hassasiyetleri açısından farklılık olmakla beraber kontrol edilecek malzeme ve aranan hataya göre seçim yapılmaktadır. Ancak bu yöntemlerin ekipman ve korunma isteri açısından zorluklarından dolayı bu tez çalışmasında özel yöntemlerden termografi yöntemi araştırılmıştır ve çalışılmıştır.

Hava araçlarının servis ömürleri boyunca yapısal parçalarının belirli periyodlarla tahribatsız kontrollerinin yapılması gerekmektedir. Kontroller esnasında uçağın yerde kalma süresi askeri uçaklarda harbe hazırlık konusunda zafiyet, sivil uçaklarda maliyet zararına neden olmaktadır. Bu nedenle hızlı ve etkili tahribatsız kontrol yönteminin seçilmesi önemlidir.

Hava araçlarındaki kompozit malzemeler; yapısal bileşenler, uçuş kontrol yüzeyleri, ulaşım kapakları, iç yapılardaki kapak ve koruyucu olarak kullanılmaktadır. Kompozit yapılar özellikle uçak için birinci öncelikli alanlar olan uçuş kontrol yüzeylerindeki periyodik kontrolleri çok önemlidir. Ayrılma, yapışmama, iç yapıdaki bozulmalar, nemlilik, kırılma, delik ve göçükler hasarları tipik olarak saptanmaktadır. Bu hasarların kontrol edilmesi için gerekli tahribatsız muayene yöntemleri çeşitli olmasının yanında parçaların uçak üzerinde temas ederek ya da uçak üzerinden sökülüp özel istasyonlarda kontrol edilmesi gerekmektedir. Parçaların hava aracı üzerinden sökülüp, takılması, ayar edilmesi ve uçağın tam olarak kalifikasyonu bu kontrollerin uzamasına ve maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca kullanılacak özel teçhizat maliyetleri ve kalibrasyonları da ekstra maliyet ve süre gerektirmektedir.

Uçak yapılarında kullanılan kompozit malzemelerin tahribatsız muayene yöntemleri:

1) Görsel kontrol yöntemi ile tahribatsız muayene: Görsel kontrol veya göz ile muayene, bir nesnenin direkt veya endirekt olarak belirlenen kriterlere göre, bir insan tarafından, hata olup olmadığının kontrol edilmesi ve malzeme ile ilgili kararın verilmesidir. (Çalık, 2017)

Avantajları: Hızlı uygulanabilir, ekonomik bir kontrol yöntemidir ve hata tespitinde çok başarılı bir yöntemdir.

Dezavantajları: Sadece dış yüzeydeki/harici hatalar tespit edilir. İç yapı hakkında bilgi vermez. Personel tecrübesi çok önemlidir. Personel dikkati çok önemlidir, göz yanılgıları olabilir.

Tespit edilebilen hata tipleri: Harici hasarlar, petek malzeme kaplamasında ayrılma (büyük ayrılmalarda), metal metale ayrılma (kesit görünüşünün görülebildiği yerlerde), göçük delik, kırık.

2) Ultrasonik kontrol yöntemi ile tahribatsız muayene: Yüksek enerjili ve frekanslı ses dalgaları kullanımı ile malzeme üzerinde ölçüm yapma prensibine dayanır. Malzeme üzerinde, süreksizlik, malzeme kalınlığı gibi çeşitli hata ve özelliklerin tespit edilmesinde oldukça hassas bir kontrol yöntemidir.

Avantajları: Hem yüzeye yakın hem de derinlerde bulunabilecek hataları tespit etmek mümkündür. Diğer kontrol yöntemlerine göre derinlerde kontrol yapılabilir (en fazla 6 metre) Hata şekli ve boyutu çok hassas bir şekilde tespit edilebilir. Otomatik sistemler ile malzeme üzerinde hata haritalaması yapılabilir.

Dezavantajları: Yavaş ve uzmanlık gerektiren, eğitilmiş ve sertifikasyonu bulunan personel ihtiyacı vardır. Malzeme kontrolü için temas gereklidir ve malzeme-ölçü aleti arasına kuplaj malzemesi ihtiyacı bulunur. Yüzeyi kaba, şekli düzensiz, çok küçük, ince ve heterojen parçalardaki kontrol edilemez. Kalibrasyon ve referans malzeme ihtiyacı bulunmaktadır.

Tespit edilebilen hata tipleri: Katmanlı yapılarda katlar arası yapışmama, kalınlık farklılıkları, yapışma derecesi, katlar arası yabancı madde tespitinde kullanılır. Katmanlı kompozit malzemelerin hata tespitinde en çok kullanılan temaslı tahribatsız kontrol yöntemidir.

3) Radyografik kontrol yöntemi ile tahribatsız muayene: Radyografi, parça içine radyasyon girişiyle yapılan bir muayene şeklidir. (NDT Resource Center, 2019)

Avantajları: Hem yüzeyde hem de yüzeyin altında/dahili hatalar tespit edilebilir. Nem hasarının tespit edilebildiği yöntemdir. Temassız bir kontrol yöntemidir. Elde edilen sonuçların kaydedilmesi/arşivlenmesi kolaydır.

Dezavantajları: Yüksek teçhizat maliyeti ve radyasyon tehlikesi vardır. Eğitilmiş, deneyimli ve sertifikalı personel ihtiyacı vardır. İncelenecek malzemenin her iki tarafına ulaşılabilir olması gereklidir.

Tespit edilebilen hata tipleri: Sandviç yapılarda ve katmanlı yapılarda nem, yabancı madde, metal kompozit yapılarda çatlak tespitinde kullanılır.

4) Girdap akımları yöntemi ile tahribatsız muayene: Elektromanyetizma prensiplerine göre çalışan yöntemdir. Girdap akımları elektromanyetik indükleme işlemi ile oluşur. *Avantajları:* Yüzey malzemesi süreksizlikleri ve malzeme kalınlık ölçümü yapılır. Yüzeyle temas gerektiren bir kontrol yöntemidir.

Dezavantajları: Özel teçhizat, eğitilmiş ve deneyimli personel ihtiyacı vardır.

Tespit edilen hatalar: Elektriksel iletken kompozit yapılarda (metal ve CFRP gibi) yüzey süreksizliklerinin tespitinde, kalınlık ölçümünde kullanılır.

5) Nüfusiyet/Penetrant kontrol yöntemi ile tahribatsız muayene: Dar ve kapalı bir alana hapsedilen ve ıslatma yeteneği olan sıvı, yukarıya doğru çıkar, bu penetrant sisteminin çalışma mantığıdır.

Avantajları: İnsan gözünün fark etmesi mümkün olmayan yüzeye açık hataların tespitinde kullanılır. Büyük parçaların veya alanların kolayca ve düşük maliyette kontrolü yapılabilir.

Dezavantajları: Sadece yüzeye açık süreksizlikler tespit edilebilir. Yüzeyin temiz, pürüzsüz ve gözeneksiz olması gereklidir. Proses öncesinde ve sonrasında hassas temizlik ihtiyacı vardır. Mekanik temizleme kullanıldığında, hata tespitinde hatalar meydana gelebilir, süreksizlik gizlenebilir. (Metal sıvaşması)

Tespit edilebilen hata tipleri: Özellikle sandviç metal olan kompozit yapılarda, yüzey kaplama malzemesindeki yüzeye açık hatalarının tespitinde kullanılır. Bu hatalardan yüzey malzemesi içinden iç yapılara nüfus etmiş ise bu alandan içeriye sıvı girişi olur ve sandviç yapıda nemlilik kusuruna neden olur.

Tahribatsız muayene yöntemlerinin karşılaştırmalı özellikleri Tablo 1 'de gösterilmiştir. Bu beş yöntememin haricinde özellikle malzemedeki boşluklar, inklüzyonlar, kalıntı, yabancı madde, yapışmama, sıvı girişi veya kirlenme, yabancı maddeler, hasarlı veya kırılmış yapısal montajlar hasarlı TRK yöntemi ile tespit edilebilir. Hızlı ve malzemeye temas etmeden kontrol sağlanabilir.

Çizelge 1.1: Karşılaştırmalı tahribatsız muayene yöntemleri (Baylan, 2019)

	Ultrasonik	X-Ray	Eddy Current	Görsel Kontrol	Penetrant
Yatırım Masrafı	Orta – Yüksek	Yüksek	Ucuz – orta	Ucuz	Ucuz
Kullanım Masrafı	Çok az	Yüksek	Az	Az	Orta
Sonuç Süresi	Hemen	Geç	Hemen	Hemen	Kısa Gecikme
Geometri Etkisi	Önemli	Önemli	Önemli	Önemli Değil	Çok Önemli Değil
Erişim Problemi	Önemli	Önemli	Önemli	Önemli	Önemli
Hata Çeşidi	Yüzey altı	Çeşitli	Yüzey	Yüzey	Yüzey Kırılmaları
Hassasiyet	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek	Az
Kayıt	Pahalı	Standart	Pahalı	Standart	Ender
Operatör Ustahğı	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek	Az
Operatör Eğitimi	Önemli	Önemli	Önemli	Önemli	
Eğitim İhtiyacı	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek	Az
Ekipman Taşınabilirliği	Yüksek	Az	Yüksek-orta	Az	Yüksek
Malzeme Kompozisyonuna Bağlılık	Çok	Nadir	Çok	Nadir	Az
Otomasyona Yatkınlık	İyi	Nadir	İyi	Nadir	Nadir
Yetenek	Kalınlık ölçümü; bazı kompozisyon testleri	Kalınlık ölçümü	Kalınlık ölçümü, derece sıralama	Sadece Hata	Sadece Hata

Bu tez çalışmasında, tahribatsız kontrol yöntemlerinden farklı olarak özel yöntemlerden TRK yöntemi incelenmesi amaçlanmıştır. Öncelikle TRK için gerekli teknik bilgi birikimi araştırılmıştır. Bu kontrol yönteminin havacılıkta kullanılan kompozit malzemelerde kullanılabilirliğinin araştırılması, kontrol edilebilmesi için tipik hasar tiplerinin temsil edecek kupon test malzemelerin üretilmesi ve TRK kullanarak hasarların tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Hava araçlarının tahribatsız kontrolleri esnasında hava aracı üzerinden malzeme sökülmesi ya da hava aracının hizmetten çekilmesi gerekmektedir. Ancak TRK ile hava aracı servisten kesilmeden ve temas etmeden kontrol sağlanır. Hızlı ve tekrar edilmesi kolaydır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Uçak kompozit yapılarının hasarlanması durumunda tüm parçanın değiştirilmesi çoğunlukla ekonomik olarak mümkün değildir; bu nedenle, bileşenin onarımı tek uygulanabilir çözümdür. Ayrıca, uçakların yerde kalış süreleri maliyet işletmecilerine önemli miktarda para kaybettirmektedir, böylece uçağın mümkün olan en kısa sürede servise geri gönderilmesi sağlanmalıdır. Hasar görmüş kompozit sandviç ve katmanlı yapıların yapıştırıcı ile yapıştırılmış onarımı, onarımın etkinliğini ve yapısal bütünlüğünü sağlamak için göz önünde bulundurulması gereken çeşitli faktörler nedeniyle karmaşık bir sorundur. (Automation Technology GmbH, 2019) Bu faktörlerin bazıları sertlik, kuvvet, dengeleme, çalışma sıcaklığı, dayanıklılık ve aerodinamik düzgünlüğü içerir. Sürekli artan kompozit parça kullanım miktarı ile birlikte etkili onarım prosedürleri için standart bir gereklilik yoktur. Her uçak üreticisi, testlerine ve analizlerine dayanarak özel olarak her tip tasarım uçağı için benzersiz onarım prosedürleri oluşturmuştur. (Anish vd, 2016)

Bu çalışmada, termografi tekniğı kullanılarak askeri ve sivil hava araçlarında kullanılan cam elyaf malzemeden test parçaları üretilmiştir ve çeşitli hasar tipleri benzetimi yapılmıştır. Hasar tiplerinin TR olarak karşılaştırılması ve tespiti çalışılmıştır.

Günümüzde kompozit malzemelerin gelişmesiyle termografinin kullanımı da her geçen gün artmaktadır. Termografinin alt dalları ile beraber ürün çözümleri de artmaktadır. (Sharlon, 2008)

Kompozit malzemelerin gelişmesi ile birlikte uçak yapılarında kullanılan büyük yapısal kompozit malzemeler seri sistemlerde üretilmektedir. Gerek insan günün azaltılması gerekse üretim hızını arttırmak için üretim esnasında temassız termografi çalışmaları uçak yapılarında kullanılmaktadır. (Ullmann vd., 2010)

Havacılık bileşen kusurlarının bir seçimini tespit etmek için termografinin etkinliğini incelenmiştir. (Avdelidis, vd., 2003) Kızılötesi termografi, incelenen tüm örneklerde mükemmel sonuçlar vermiştir. Yedi kat karbon veya bor epoksi kompozit yamaların altındaki çentikler ve benzetim yapılmış, tabakalaşma açıkça tanımlanmıştır. Ayrıca, termografi

delinmiş delikler etrafında karbon fiber koparma derecesini ortaya çıkarmak için mükemmel bir araç olduğunu göstermiştir. Tekniğin avantajları, yüzey veya yakın yüzey kusurları için hızla geniş alanları araştırması ve kolayca yorumlanabilir sonuçlar üretmesidir. Dezavantajı, başarısının kusur derinliğine ve boyutuna bağlı olmasıdır, bu da uygulamasını yakın yüzey kusur görüntülemesine için kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Kompozit üretim hatları boyunca muayene endüstride zorlu bir durumdur. Termografi tekniği kullanılarak uzun bir katmanlı kompozit yapının hasar tespiti yapılmış ve hattı boyunca oluşan mekanik titreşimler termografik görüntüde buğu ve çözünürlüğün bozulmasına neden olmuştur. (Peeters vd., 2019)

Kompozit sandviç yapılar özel avantajları nedeniyle uçak, otomobil, demiryolu transit ve benzeri gibi imalatta geniş uygulamalara sahiptir. Bununla birlikte, üretim ve hizmet süresi boyunca petek/çekirdek yapısında her zaman kusurlar vardır, sıvı girişi ve yapışmama/ayrılma en tipik kusurlardır. Sandviç yapıların bu tip hatalarını Darbeli termografi uygulanmıştır, ani bir ısı kaynağı altında kusur tespiti için ısı iletiminin teorik modeli analiz edilmiştir; İki tipik kusur tespiti için birkaç çeşit Petek kompozit numune tasarlanmıştır; numunelere Darbeli termografi uygulanır ve kusurlar termal görüntü dizisi işleme ile ortaya çıkartılmıştır. Ayrıca, logaritmik sıcaklık azalan eğrileri analiz edilerek kaplama altında sıvıların farklı ayırt edebilir. Sonuçlar, darbeleri termografinin Petek kompozit NDT için avantajlara sahip olduğunu göstermektedir. (Chen vd., 2019)

Termografi, düşük frekanslı termal dalgalar kullanarak termal özelliklerin uzaktan görüntülenmesini sağlar. Kısa görüntüleme süresi boyunca (genellikle 4 dakika), birkaç m²'ye kadar olan büyük bileşenlerin yapı bütünlüğünü izleyebilir. Bu muayene, denetlenen bileşenin herhangi bir modifikasyonunu gerektirmediğinden, örneğin, dağılma, gizli korozyon veya etki alanlarını tespit etmek isteyen havacılık yapılarının hızlı muayenesi için çok uygundur. (Wu vd., 1997)

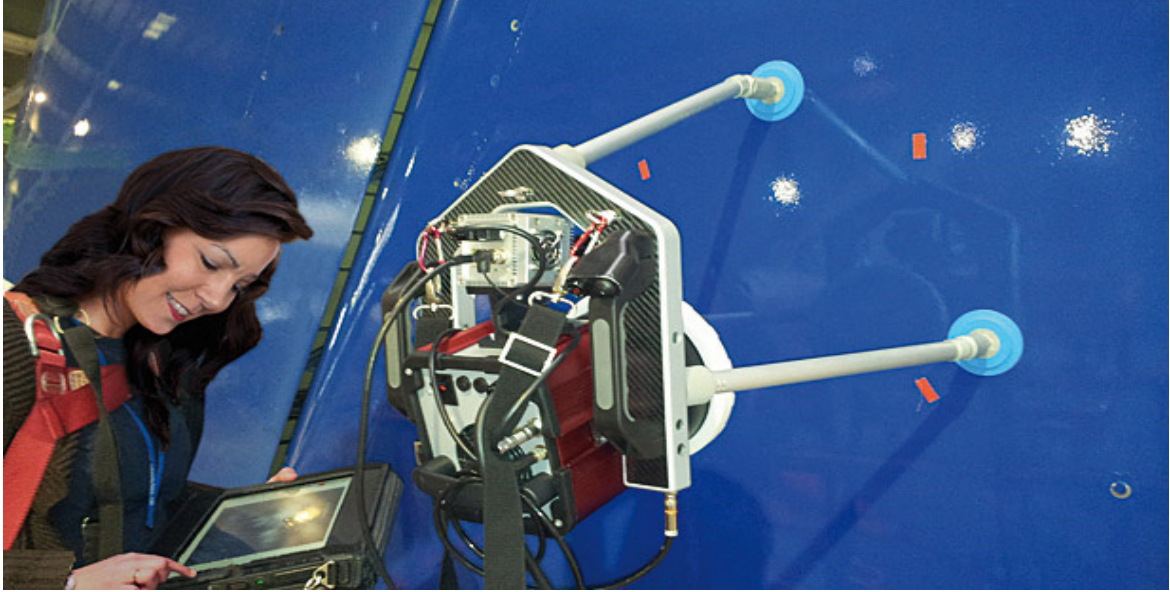
Askeri uçakların servis ömrü boyunca desteği için aktif Kızılötesi termografinin uygulanmasında Avustralya Savunma Bilim ve Teknoloji Örgütü tarafından çalışmalar yapılmıştır. Aktif termografi henüz Avusturya Savunma Gücü içinde standart bir Tahribatsız Muayene tekniği olarak uygulanacak olmasına rağmen, uçakların teknik kitaplarında bu

prosedür bulunmamakta ve tanımlama yapılması gerekmektedir. Uçak yapımında kompozit malzemelerin artan kullanımı ile termografi geniş bir alan görüntüleme tekniği olarak, nispeten yüksek denetim hızında diğer tekniklerin çoğuna göre büyük bir avantaja sahiptir. Mevcut NDI prosedürleriyle ilişkili işgücü maliyetlerini azaltma potansiyeline sahiptir ve bazı durumlarda uçak operasyonel kullanılabilirliğinde iyileştirmeler teşvik edilmelidir. Bunlar, yeni bir denetim yeteneği için durumun değerlendirilmesinde önemli faktörler olsa da ilişkili eğitim yükü de hayati bir husustur. Kızılötesi termografi görsel bir tekniktir ve teknisyenler için diğer birçok NDI formundan daha sezgiseldir. (Rajic vd., 2010)

AW-139 helikopterin bir parçası olan CFRP (karbon fiber takviyeli polimer) kompozit panelde delaminasyon tespiti için aktif termografi yönteminin uygulanması sunulmuştur ve tartışılmıştır. Araştırma sırasında bir iletim yöntemi kullanılırken, uyarma optik kaynak (halojen lambalar) kullanılarak yapılmıştır. Deneysel testler ardışık delaminasyon yaratımına göre üç aşamaya ayrılmıştır. Kızılötesi kameradan alınan ham sinyaller analiz edilmiş ve işlenmiştir. (Mieloszyk vd., 2012)

Uçakların tasarım ve üretiminde kompozitlerin kullanımı hızla artmaktadır. Askeri ve spor uçaklar için, kompozitler vazgeçilmez bir malzemedir. Ticari havacılıkta bu eğilim, Boeing 787 ve Airbus A350 gibi yeni nesil uçaklara, karbon grafit kompozitlerden üretilen ana yapı elemanlarının içeriği oldukça yüksektir. Tasarımcılar için kompozitlerin kullanımıyla ilişkili avantajlar açık olmakla birlikte, bu malzemeler muayene ve bakım teknisyenleri için birçok yeni zorluk sunmaktadır. Yüksek güvenlik standartları ve maliyet etkinliği sağlamak için çok sayıda gereksinimi karşılayan gelişmiş NDT yöntemleri gerekir. Kompozit malzemeler için tipik olan farklı kusurların doğru tespiti, kolay işlenebilirlik, geniş alanların hızlı kontrolü, kapsamlı sökme veya özel tesislere ihtiyaç duyulmadan hizmet içi denetim, denetim sonuçlarının denetçinin tecrübesinden bağımsız olarak analiz edilmesi (insan faktörüne daha az bağımlı olma) ve sonuçların izlenebilirlik açısından kolay arşivlenmesi gereklidir. Genel olarak bu gereksinimler termografiye dayalı sistemler tarafından yerine getirilebilir. Son yıllarda bu tekniği geliştirmek ve kullanıcı dostu hale getirmek için büyük çaba harcanmıştır. Termografi, NAS410 ve EN4179 gibi uluslararası NDT standartlarına tamamen tanıtılmıştır. Havacılık endüstrisinde termografi, birincil NDT yöntemi olarak artan sayıda uygulamada kullanılmaktadır. Geçmişte termografi ekipmanı çok pahalı olmasına rağmen, yakın zamanda geliştirilen portatif sistemler şimdi iyi ultrasonik test ekipmanı

fiyatıyla temin edilebilir. Tipik olarak sivil havacılıkta kullanılan portatif termografik kontrol cihazı Şekil 2.1’de gösterilmiştir. (Automation Technology GmbH, 2019)



Şekil 2.1.Sivil havacılıkta termografi kullanımı(Automation Technology GmbH, 2019)

Termografik kontrolde kullanılan termal kameraların ucuz ve pahalı olan çeşitli kameralar vardır. Kaliteli kameralar genellikle daha büyük piksel dizisinin (en son 1280 x 1024) masrafından dolayı yüksek bir fiyat aralığına (genellikle 3,000 ABD Doları veya daha fazla) sahipken, daha az pahalı modeller (40x40 piksel dizileriyle 160x120 piksele kadar) de mevcuttur. Daha az piksel, görüntü kalitesini düşürür ve böylece yakın hedefleri aynı görüş alanında ayırt etmeyi zorlaştırır. Yapılan bu çalışmada 362x268 piksel sıralı termal kamera kullanılmıştır.

Yenileme oranında da termal kameralar arasında farklıdır. Bazı kameralar, tam pencere modundayken yalnızca 5–15 Hz, diğer (örneğin FLIR X8500sc (FLIR System Inc., 2017)) 180 Hz veya daha yenileyici değerine sahip olabilir. Yapılan çalışmada kullanılan kamera 80Hz yenileme hızına sahiptir. Kullanılan sistemde sabit odak uzaklıklı lense sahip olmasından dolayı net görüntü mesafesi sabittir. Uzak, yakın ve geniş açı görüntü alınmasında sınırlılıklar vardır.

Birçok kamera modeli, çıktı görüntüsünü oluşturmak için kullanılan ışınım ölçümlerini sağlamaz; emisyon, mesafe ve ortam sıcaklığı ve bağıl nem için doğru bir kalibrasyon olmaksızın bu bilginin kaybı, ortaya çıkan görüntülerin doğal olarak yanlış sıcaklık

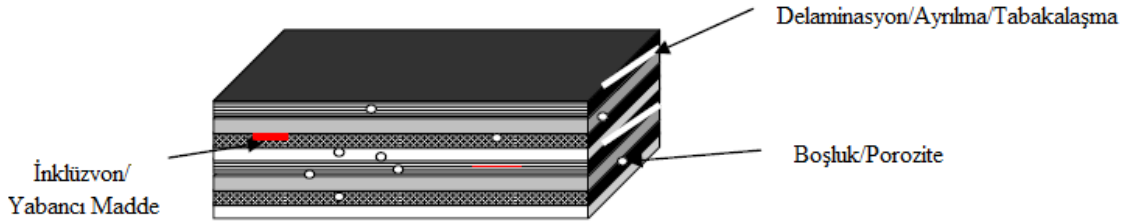
ölçümleri olmasını gerektirir. Aktif termal görüntülemeye bu sorun azaltılsa da, belirli nesnelere, özellikle de hatalı sıcaklıklara sahip nesnelere dayalı olarak resimlerin doğru yorumlanması zor olabilir. Belirli nesnelere, özellikle düzensiz sıcaklıklara sahip nesnelere dayandığında görüntülerin doğru bir şekilde yorumlanması zor olabilir. (Omega Engineering, Inc., 2018)

Termografik kameralar, aldığı radyant ısı enerjisine dayalı termal görüntüler oluşturur. (International Electrical Testing Association, 2019) Termal radyasyon seviyeleri, ölçülen yüzeyden güneş ışığı gibi radyasyonun emisyonu ve yansımasından etkilendiğinden, bu ölçümlerde hatalara neden olur. Çoğu kamera, sıcaklık ölçümünde $\pm\%2$ doğruluk veya daha kötüdür ve temas yöntemleri kadar doğru değildir. Yöntemler ve kameralar, yüzey sıcaklıklarını doğrudan tespit etmekle sınırlıdır.

3. TEORİK BİLGİ

Hava araçlarında kullanılan kompozit malzemelerindeki termografik inceleme prosedürleri, homojen/aynı yapısal oluşumdaki parçaların malzemelerindeki yerel değişiklikleri bulmak için kullanılabilir. Tipik yapısal değişimler/kusurlar katmanlı yapı üzerinde Şekil 3.1’de gösterildiği gibidir.

- Boşluklar
- İnklüzyonlar, kalıntı, yabancı madde
- Yapışmama
- Sıvı girişi veya kirlenme
- Hasarlı veya kırılmış yapısal montajlar



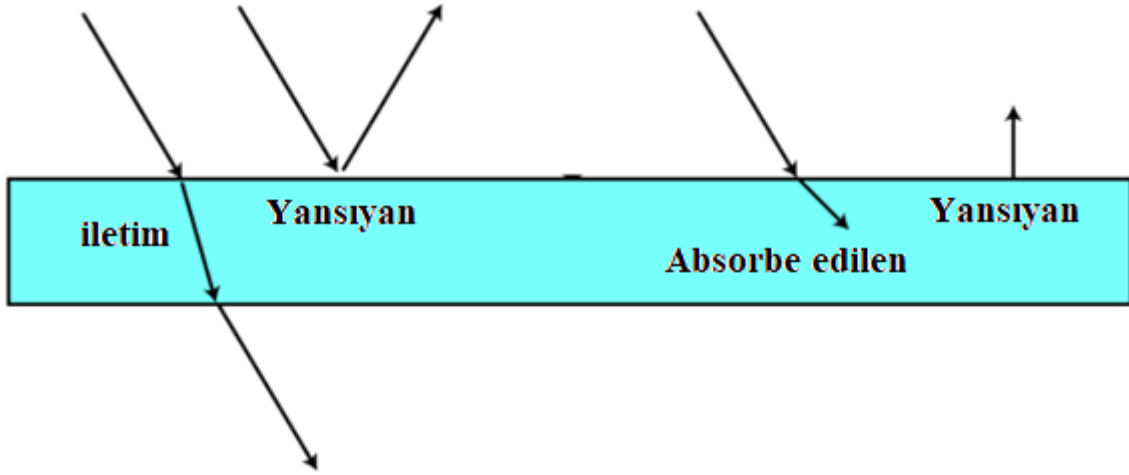
Şekil 3.1. Tipik kompozit kusurları (P. Theodorakeas, 2011)

Hava aracı yapımında kullanılan hemen hemen her türlü malzeme üzerinde termografik inceleme yapılabilir. Tahrik, tespit ve muayene parametreleri, kontrol edilecek malzemeye ve tespit edilecek süreksizliğe bağlıdır. Termografik inceleme yapmak için, bir bileşen içinden bir ısı akışına sahip olmalıdır. Bu sadece bileşen/malzeme bir termal denge koşulunda olmadığı zaman ortaya çıkabilir.

3.1 Termografinin Tanımı

Termografi, bir nesnenin yüzey sıcaklığındaki farklılıkların tespitinde ve haritalanmasında termal radyasyon kullanılmasıdır. X ışını, UV ışını ve diğer tüm elektromanyetik radyasyon türlerinde olduğu gibi termografik incelemelerde kullanılan termal radyasyon; Şekil 3.2’de gösterildiği gibi yansıyan, iletilen, absorbe edilen ve yayılandır.

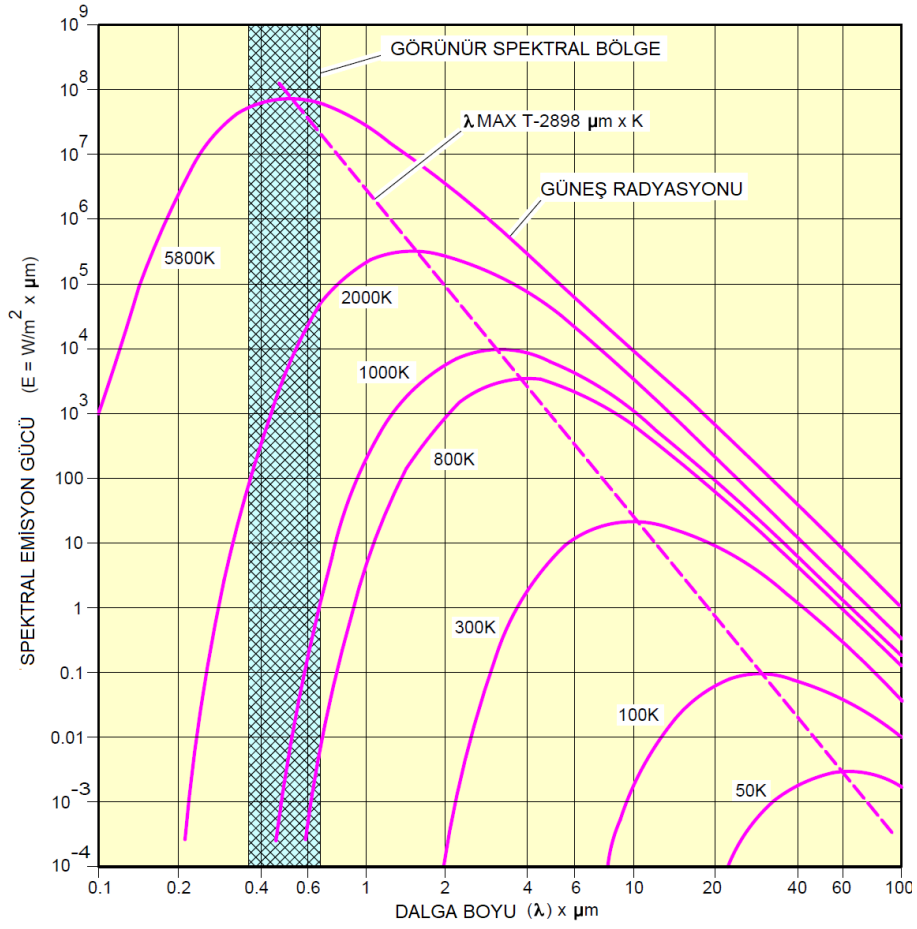
Termografik radyasyon yayılan ve yansıyan radyasyonlardan yapılır. Emissivite (yayınım), yüzey tarafından yayılan radyasyonla ilgili olan özelliktir. Mutlak sıfırın üzerindeki sıcaklıklarda bulunan nesnelere ($0^{\circ} \text{K} = -273^{\circ} \text{C} = -459^{\circ} \text{F}$), elektromanyetik spektrumda elektromanyetik radyasyon yayar. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi sıcaklığına bağlı olarak dalga boyunda belirgin bir azami emisyon vardır. Genellikle tahribatsız muayene, termografik incelemelerinde kullanılan şekil 3.4'te gösterildiği gibi elektromanyetik spektrum aralığı, kızılötesi banttaki 3 ila 30 mikrometre arasındadır.



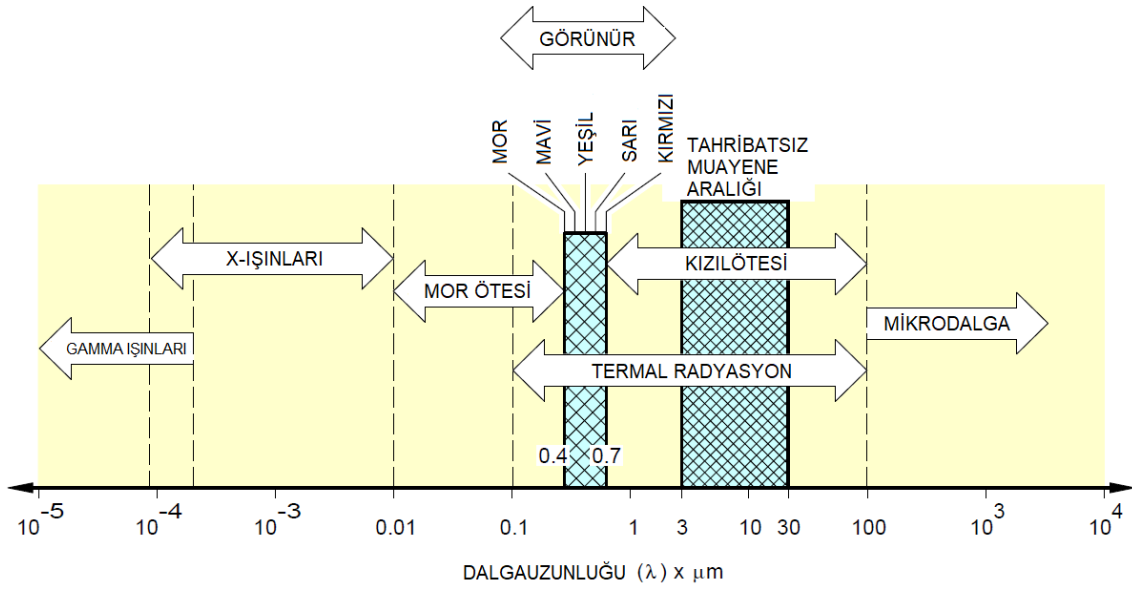
Şekil 3.2. Termal radyasyon türleri (Keiner, 2019)

3.2. Termal Sınıflandırma

Termografik kontrol yapılacak kısım termal aktif ve pasif olarak ikiye ayrılır. Termal aktif malzemeler çalışma sırasında ısı akışına sahip cisimlerdir. Termal pasif malzemeler ısı akışına neden olmak için harici bir ısı kaynağına ihtiyaç duyan nesnelere. Örneğin, bir hava aracı inişten hemen sonra termal olarak aktif bir nesne olabilir. Daha sonra çevre ile aynı sıcaklıkta olduktan sonra termal olarak pasif olacaktır. Termal olarak aktif malzemeler için test parametreleri hava aracının çalışma koşullarına göre belirlenir. Bu koşullar değişmeden kaldığında, muayene tekrarlanabilir.



Şekil 3.3. Çeşitli sıcaklıklardaki spektral emisyon örneği
(AIRBUS Defence & Space, 2018)



Şekil 3.4. Elektromanyetik radyasyon spektrumu (AIRBUS Defence & Space, 2018)

3.3 Termal Uyarma Yöntemleri

Termal olarak pasif nesnelere ısı akışına neden olmak için kullanılan birçok yol vardır. Kaynak türü ve akışa neden olan prosedür, inceleme sonuçları üzerinde büyük bir etkiye sahip olacaktır.

Isı Uygulama Sistemleri

Pasif nesnelere akışa neden olmanın tipik yolu, ısı uygulamasıdır. Isı temini için tipik sistemler:

- Battaniler
- Fırınlara
- Kızılötesi lambalar
- Sıcak hava kaynakları
- Darbeli flaş ışığı

Soğuk Uygulama Sistemleri

Bazı durumlarda, nesne soğutulmalıdır. Tipik sistemler:

- Aerosoller
- Soğuk hava jetleri
- Dondurma makineleri
- Kriyojenik sıvı
- Buharlaştırma

3.4 Tekniğin Hassasiyeti

Tekniğin duyarlılığı üç ana faktöre bağlıdır:

- Uyarma parametreleri
- Malzeme özellikleri
- Harici özellikler (Sadece temassız termografik yöntemler için geçerlidir).

3.4.1 Uyarma parametreleri

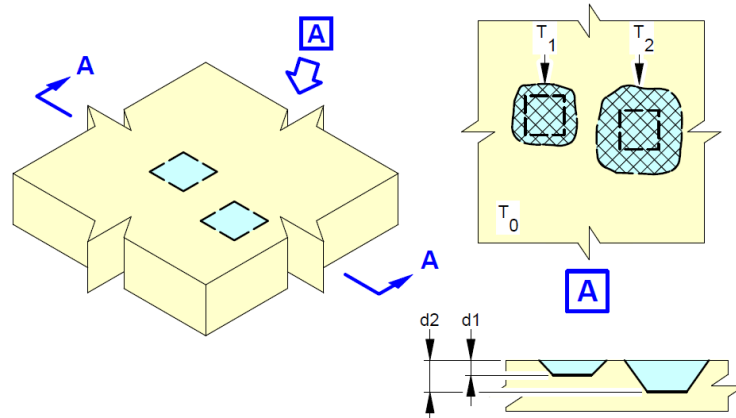
Uyarma yöntemi (ısı akışı kaynağı), sıcaklık ve zaman aşağıdakilerle ilgilidir:

- İncelenecek bileşenin özellikleri
- Kusurun tipi
- Kullanılan uyarma teknikleri.

3.4.2 Malzeme özellikleri

Malzemelerin özellikleri, denetlenecek olan bileşen boyunca ısı yayılımını etkilemektedir. Termal iletkenlik, öz ısı, yoğunluk ve iç kesit farklılıkları malzemenin ısı yayılımını etkileyen özellikleridir. Termal denge dışındaki bir nesne, ısı yayılımı ile dengeye durumuna gelir. Malzemedeki yerel değişiklikler/iç kesit farklılıkları, ısı akışının sabit olmadığı termal özellikler üzerinde bir etkiye sahip olabilir. Bu malzemenin yüzeyinde sıcaklık farkları yaratır. Örneğin, sıcaklıktaki değişim, daha yüksek özgül ısıya sahip bölgelerde daha yavaş olacaktır.

Bir nesne içindeki ısı yayılımındaki farklılıklar nedeniyle denetim sınırlamaları oluşabilir. Örneğin olarak Şekil 3.5'te gösterildiği gibi bir nesnedeki farklı konumlarda bulunan bir materyaldeki iki yerel değişiklikten ölçülen sıcaklıklar farklı olabilir.



NOT

Farklı derinliklerde bulunan iki benzer yerel malzeme değişimi (d_1 , d_2).

$$(T_1 - T_0) = (T_2 - T_0)$$

Malzeme ne kadar derin olursa, termal yüzey göstergesi o kadar az hassas tanımlanır.

Şekil 3.5. Isı yayılımını nedeniyle etkiler (AIRBUS Defence & Space, 2018)

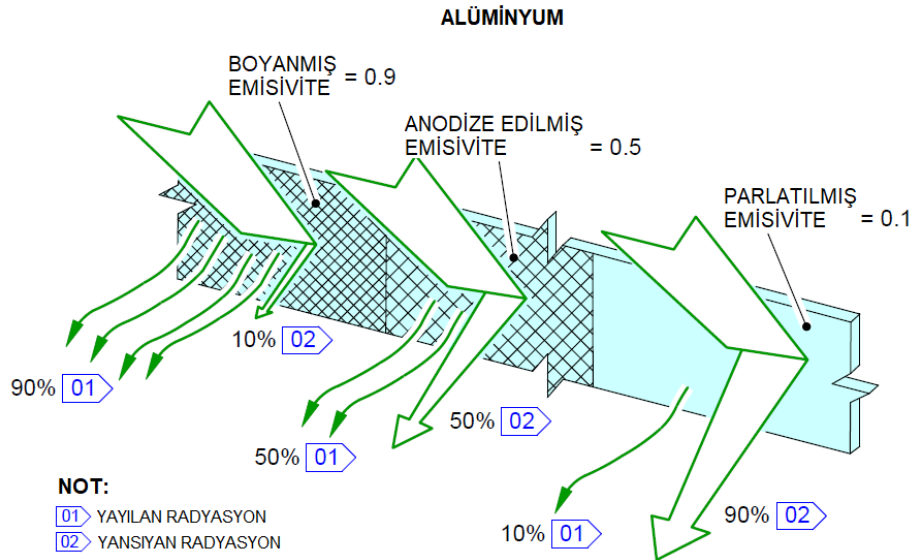
Aynı fakat farklı derinliklerde bulunan bir malzemedeki yerel değişiklikler yüzeyde farklı sıcaklıklar verecektir. Termografik göstergelerin boyutları gerçek yerel değişiklikten daha büyük ve daha az tanımlanmış olacaktır. Bu etki yerel değişimden kaynaklanmıyor, derinliğinden kaynaklanıyordur. Termografik kontrol malzemenin derinliği ile sınırlıdır.

3.4.3 Dış özellikler

(Sadece temassız termografik yöntemler için geçerlidir)

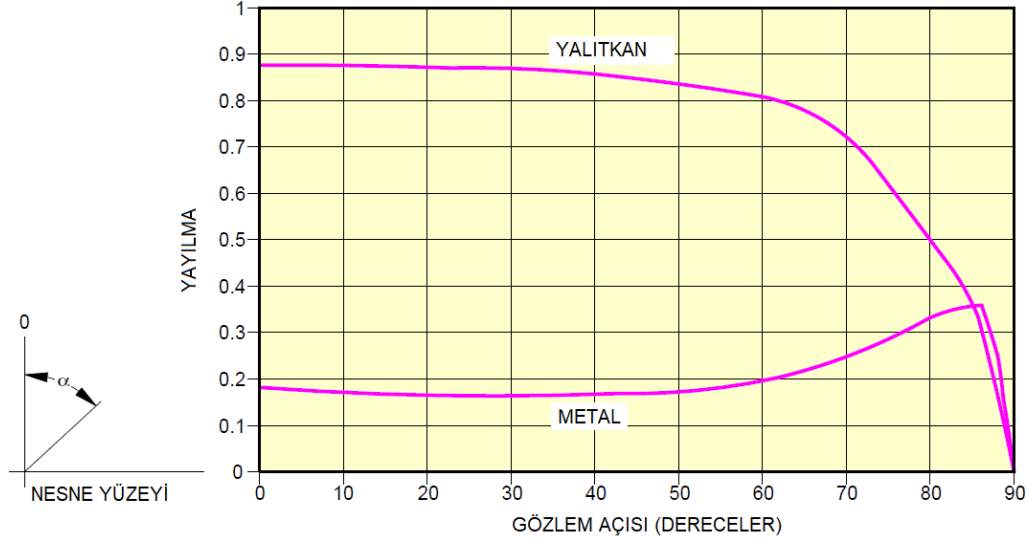
- Yüzey kaplaması ve çevresel koşullar gibi dış özellikler incelemenin sonuçlarını etkileyecektir.
- Emissivite Etkisi

Emissivite, bir nesnenin yüzeyinin bir özelliğidir. Termal radyasyonun hangi bölümünün nesnede yayıldığını ve hangi bölümün yansıdığını belirler. Yayılmayı etkileyen yüzey durum örneği Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Yayılmayı etkileyen yüzey durumu örneği
 (AIRBUS Defence & Space, 2018)

Muayene hassasiyetini arttırmak için yüzeye yüksek emisyonlu bir kaplama uygulanabilir. Gövdenin gerçek sıcaklık dağılımını bulmak istiyorsanız emissivitenin değeri bilinmelidir. Katı bir nesnenin emissivite gözlem açısı ile değişir. Şekil 3.7’de gözlem açısına yayılmanın bağımlılığını gösteren grafik bulunmaktadır.



Şekil 3.7. Gözlem açısına yayılmanın bağımlılığı (AIRBUS Defence & Space, 2018)

c. Atmosferik İletim Etkisi

Atmosfer farklı gazlardan oluşuyor. Bunların her biri yayılan ısının dalga boyu ile değişen bir emme ve iletim katsayısına sahiptir. Bu, detektöre ulaşmak için atmosferden geçmesi gerektiğinden, bileşenin yüzeyinden yayılan ısı üzerinde bir etkiye sahiptir. Atmosfer, elektromanyetik radyasyon için karmaşık bir iletim katsayısına sahiptir. Bu yüzden emme etkisi, radyasyonun atmosfer boyunca kat ettiği mesafe ile değişir.

d. Yansıma etkisi

İnceleme sonuçları üzerinde kötü etki yaratabilecek herhangi bir yüzey yansımasını önlediğinden emin olunmalıdır. Aşağıdakiler gibi kontrol edilmeyen harici termal radyasyon kaynaklarının olduğu yerlerde inceleme yapmamaya dikkat edilmelidir.

- Sobalar
- Fırınlr
- Klima çıkışları
- Güçlü akkor lamba
- Çalışan motorlar.

3.5 Termografik Kamera Sistemleri

3.5.1 Genel

Bir termografik sistem gerekli işlemi yapabilmelidir. En önemli özellikler:

Sıcaklık aralığı: Sistemin ölçüm yapabildiği sıcaklık aralığıdır. Birçok kamera ayarlanabilir, böylece farklı aralıklarda kullanılabilirler.

Termal çözünürlük: Termografik görüntüde bir değişikliğe neden olacak bir cismin yüzeyindeki sıcaklık farkıdır. Dedektörün bir özelliği ve sinyal / gürültü oranıdır.

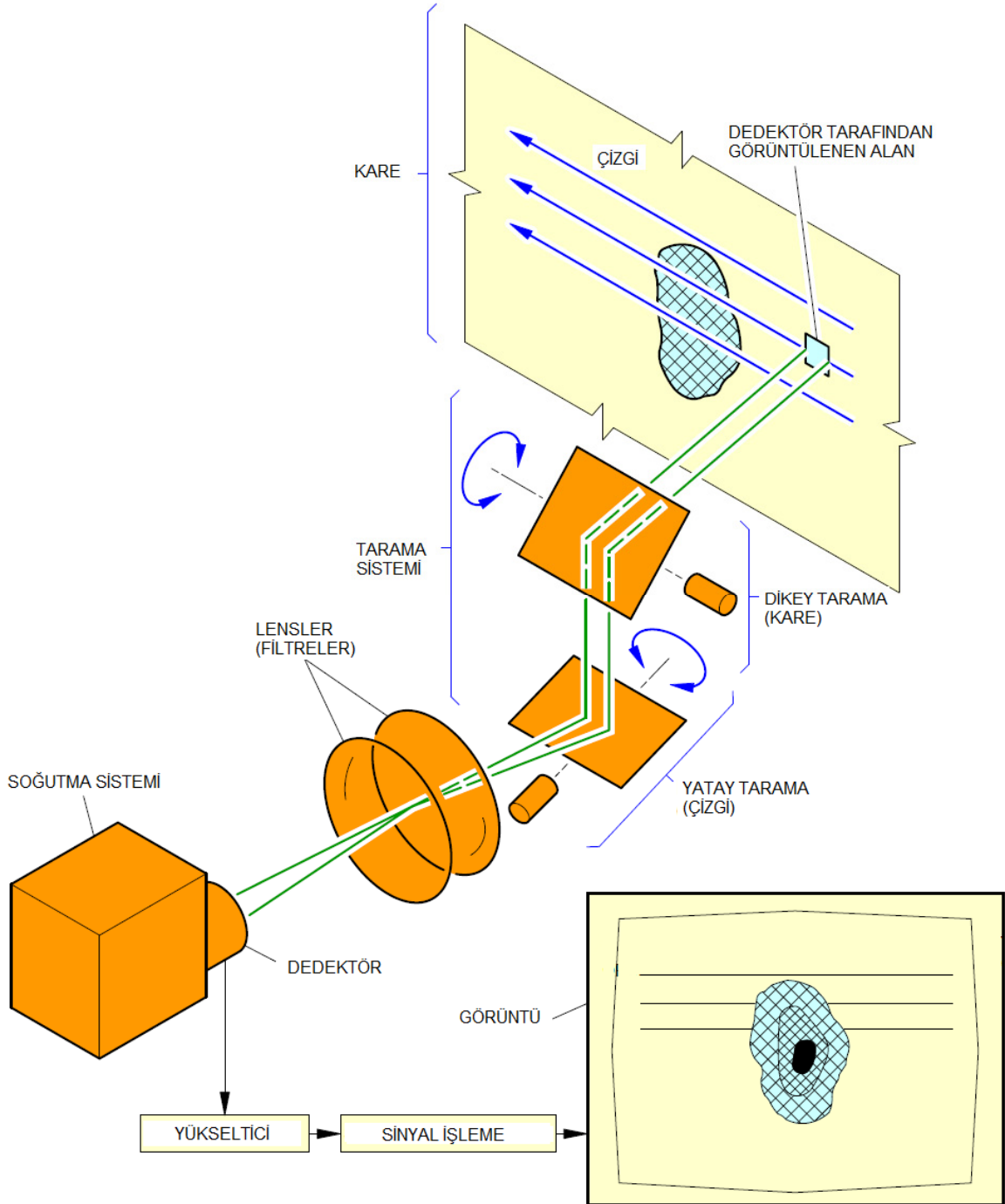
Mekânsal Çözünürlük: Görüş alanındaki iki nokta arasındaki minimum açıdır, böylece termografik görüntüde ayrı görünürler. Optik ve tarama sistemi ve görselleştirme birimi ile ilgilidir. İyi termal çözünürlüğe sahip ekipman, niceliksel sıcaklık ölçümleri yapıldığında veya muayene yüzeyindeki farklılıklar küçük olduğunda kullanılmalıdır. Alternatif olarak, kalitatif sıcaklık dağılımı ve şekillerin lokalizasyonu ve tanınması için en önemli özellik mekânsal çözünürlüktür.

Yapılan termografik görüntü normal bir video görüntüsü ile aynıdır ve kaydedilebilir veya dijital hale getirilebilir. Dijital kaydın şu avantajları vardır:

- Resimler üzerinde çalışmak ve analiz etmek kolaydır.
- Görüntüler farklı bilgisayar ortam türlerinde saklanabilir.

3.5.2 Termografik kamera

Tipik bir termografik kamera Şekil 3.8. Termal kamera örneği'nde gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Termal kamera örneği (AIRBUS Defence & Space, 2018)

Bir termografik kamera üç bölümden oluşur:

1) Hassas Elemanlar

İncelenen yüzeyin belirli bir alanındaki radyasyonu algılar. Bir dedektör veya kızılötesi radyasyon dönüştürücüsü radyasyonu elektrik sinyaline dönüştürür (voltaj veya yoğunluk). Detektörler, genellikle güvenilir ve sürekli performans sağlamak için birkaç katı hal elemanına sahiptir.

Bir detektörün özellikleri: Duyarlılık ve Sinyal / Gürültü oranıdır

a) Duyarlılık

Tespit edilen radyasyonu, genellikle volt / watt veya eşdeğer bir birim halinde verilen bir elektrik sinyaline değiştirme yeteneğini ölçer. Kızılötesi sensörlerin hassasiyeti, nesnenin ortalama sıcaklığıyla artar.

b) Sinyal / Gürültü Oranı

Bu, tespit edilen radyasyonun arka plan gürültüsüne oranını verir. Bir cihazın tespit kapasitesini veren özelliktir. Dedektör ve çalışma koşullarının oran üzerinde etkisi vardır.

Radyasyon dedektörü ve yakındaki elemanlar, birincil gürültü kaynaklarından biri olan termal emisyonlara sahiptir. İyi bir termal algılama olduğundan emin olmak için, bu gürültüyü minimumda tutmak gerekir.

Sıcaklık azaldığında, termal emisyonların miktarı çok daha düşüktür. Bu nedenle, eğer hassas eleman (ve bitişik alanlar) soğutulursa, dedektörün sinyal-gürültü oranında büyük bir artış sağlar. Bunu başarmak için kullanılan çeşitli yöntemler vardır:

- Kriyojenik sıvılar
- Gazların genişleme-sıkıştırma çevrimleri
- Joules-Thompson etkisi
- Termoelektrik etki.

Termografi yönteminde kullanılan dedektörler sadece kızılötesi radyasyona karşı duyarlı değildir, aynı zamanda görünür ve ultraviyole radyasyon gibi daha kısa dalga boylarına da sahiptir. Muayene sonuçları bu kısa dalga radyasyonları ile maskelenebilir. Filtreler kızılötesi yoluyla izin vermek için kullanılır, ancak görünen ve ultraviyole bölgelerden gelen radyasyonu durdurur. (AIRBUS Defence & Space, 2018)

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Termografik uygulamada yöntemi belirlenirken kavramsal bölümde ve literatür araştırmalarına göre belirtilen araştırma yönteminin belirtilmesi, kupon malzeme üretimi, sonra deney ortamının oluşturulması ve deneyin gerçekleştirilmesi şeklinde yapılmıştır.

4.1. Araştırma Yöntemi

Kızılötesi termografi, yüzey sıcaklıklarını bir nesneden, bir nesneye doğru, bir nesneden ve/veya bir nesneye akarken ölçen veya haritalayan NDE tekniğinden biridir. İç anomaliler, sıcaklık değerlerindeki değişim veya termal görüntülerde kusurları/anomalileri ‘sıcak/soğuk noktalar’ olarak göstermek için gelişmiş sinyal işleme teknikleri kullanılarak tanımlanır. Termografi, pasif ve aktif yaklaşım olmak üzere iki yaklaşıma ayrılabilir. Pasif yaklaşım, ortam koşullarındaki malzemeleri ve yapıları veya normal çalışmayı test ederken, aktif yaklaşım durumunda, ilgili termal kontrastı indüklemek için harici bir uyarana gereklidir. (Maldague ve Xavier., 2001) Aktif termografi genellikle darbeli termografi (PT), kademeli ısıtma (SH), kilitli termografi (LT) ve vibro-termografi (VT) olan dört yöntem olarak sınıflandırılır. PT, kompozit denetimler için en yaygın termal NDE yöntemlerinden biridir. Bu yaklaşımda, kısa bir termal darbe, metal ve karbon-karbon malzemeleri gibi yüksek iletkenlik malzemesi için birkaç milisaniyeden, grafit-epoksi katmanlı yapılar gibi düşük iletkenlik numuneleri için birkaç saniyeye kadar sürer. Malzemenin sıcaklığı ilk termal darbeden sonra hızla değişir, çünkü termal ön yüzey altında difüzyon ile yayılır. Elde edilen termal görüntüler yaklaşım çeşitleri kullanılarak işlenebilir. Bunlar, logaritmik birinci/ikinci türevleri, termografik sinyal rekonstrüksiyonu (TSR) tekniği olarak da bilinen zaman alan analizini içerir. IR görüntüsünü işlemek için yaygın olarak kullanılan bir diğer yaklaşım, yaygın olarak nabız faz termografisi (PPT) tekniği olarak bilinen faz veya genlik kullanılarak frekans alan analizidir. Benzer şekilde, IR görüntülerini işlemek için kullanılan başka bir teknik ana bileşen analizidir (PCA). Bu yaklaşımda, özellikler IR görüntü dizisinden çıkarılır ve orijinal verileri ortogonal bileşenler sistemine yansıtılarak fazlalığı azaltır. Bu çalışmada TSR tekniği ile kamera yazılımı kullanılmıştır ve zaman bandında değişimler gözlemlenmiştir.

Termografik Sinyal Rekonstrükyonu (TSR) Temel Principleri

Anizotropik katı plakadaki tek boyutlu ısı iletimi için, anlık ısıtma bir tarafa konur ise, genel denklem;

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + u''' \quad (4.1)$$

Burada, k_x, k_y ve k_z üç ana yönde termal iletkenliklerdir, ρ malzeme yoğunluğu, c özgül ısıdır ve u''' birim hacim başına üretilen ısı oranıdır. Bu ısı denklemini daha da basitleştirilebilir

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4.2)$$

Burada, $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ malzemenin kalınlığı boyunca termal yayıcısıdır. İdeal bir tahrik edici ısı akısı için, yarı sonsuz (Termal kapasiteleri, bu ısı transferi nedeniyle sıcaklıklarının ölçülebilir şekilde değişmeyeceği şekilde yeterince büyük) bir yüzey için sıcaklık tepkisi belirli bir zamanda şu şekilde ifade edilir,

$$T(x, t) = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} e^{-\frac{x^2}{4\alpha t}} \quad (4.3)$$

Burada $e = \sqrt{k\rho c}$ malzemenin termal duyarlılığıdır. Bir malzemenin termal verimliliği çevresiyle birlikte termal enerji alışverişinin bir ölçüsüdür. Termal kamera sadece yüzey sıcaklıklarına cevap verebileceğinden, yüzey sıcaklığı $x = 0$ olarak modellenir.

$$T(0, t) = T_{surface}(t) = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \quad (4.4)$$

Sıcaklık tepkisi, termal kameraya göre daha doğru bir şekilde modellenmiştir.

$$\Delta T_{surface}(t) = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \quad (4.5)$$

Burada, $\Delta T_{surface}(t)$ dış ısı uygulamasından önce ve sonra yüzeyin sıcaklığındaki farktır.

TSR tekniği, her bir pikselin zaman geçmişini, bir bütün olarak her kareden ziyade belirli bir termografik görüntü dizisinden işler. $\Delta T_{surface}(t)$ denklemi tarafından verilen zaman yanıtı verileri, logaritmik bir alana dönüştürerek doğrusallaştırılabilir.

$$\ln(\Delta T_{surface}(t)) = \ln\left(\frac{Q}{e}\right) - \frac{1}{2}\ln(\pi t) \quad (4.6)$$

Denklem incelenmekte olan malzemenin termal özelliklerinden bağımsız olarak, logaritmik bozunma tepkisinin her zaman ideal, kusur olmayan bir bölge için -1/2 eğimli düz bir çizgi olacağını göstermektedir. Gerçekte, logaritmik veriler, arka plan radyasyonu ve doğrusal olmayan kamera yanıtları gibi çeşitli nedenlerden dolayı bu ideal ilişkiden sapacaktır. Her pikselin logaritmik zaman geçmişi, n-inci derece polinom fonksiyonu kullanılarak monte edilir.

$$\ln(\Delta T_{surface}(t)) = a_0 + a_1 \ln(t) + a_2 [\ln(t)]^2 \dots + a_n [\ln(t)]^n \quad (4.7)$$

Daha sonra, 1.ve 2. türevler, kusurlar hakkında daha ayrıntılı bilgi veren denklem türevleri alınarak hesaplanır. Buna ek olarak, 5.veya 6. mertebeden polinomun, gürültüyü yeniden yapılandırmadan verileri düzeltmek için düşük geçişli bir filtre olarak etkili bir şekilde davrandığını gösterdi. Yeniden veri olarak modellenenabilir.

$$\ln(\Delta T_{surface}(t)) = \exp(a_0 + a_1 \ln(t) + a_2 [\ln(t)]^2 \dots + a_n [\ln(t)]^n) \quad (4.8)$$

Son iki denklemler kullanılarak oluşturulan logaritmik eğrilerden, kusur ve kusur olmayan pikseller arasındaki termal yayılma farkını gözlemlemek mümkündür.

Bu özel tekniğin bu çalışma için uygulanmasının temel nedeni, TSR'nin geçici IR görüntülerinin geliştirilmesi için iyi bilinen güçlü bir araçtır ve bu teknik aynı zamanda kompozitlerin IR denetimi için yaygın olarak kabul edilmektedir. (Poudel vd., 2016)

4.2. Evren ve Örneklem/Çalışma Grubu

Kompozit malzemelerin tahribatsız muayenesi yapılırken öncelikle aranılacak hata ve kusura göre yöntem seçilmesi gereklidir. Ayrıca bu kusurun hatasız parça ile farklılığının, ölçüm yöntemi ile tespit yöntemindeki farklılığın bilinmesinde gereklidir. Kompozit malzemelerdeki tahribatsız kontroller için öncelikli olarak hem az maliyetli hem de gerçek malzeme benzetim yapabilecek kupon test numuneleri ya da NDE kalibre blokları kullanılmaktadır. Tahribatsız Muayene Kalibre bloklarının kullanım amacı aranılacak hatanın küçük bir malzemede bilinip, ölçüm cihazının gönderilen sinyale cevabının bilinmesi, bu sonuca göre de gerçek malzeme üzerinde kalibreli ve doğru sonuçlara ulaşılmasıdır.

Bu çalışma askeri uçaklarda kullanılan kompozit ham malzemelerden referans/örnek malzemeler imal edilerek, bu malzemelerde kontrol çalışmaları yapılması düşünülmüştür. Muhtemel kompozit malzeme hata/kusurları bu malzemelerin üretim esnasında oluşturulmuştur. Yapılan kasıtlı hata/kusurların termoradyografi yöntemi ile kontrolü amaçlanmıştır.

4.2.1. Örnek ham malzemelerin seçilmesi

Tez çalışmasında kullanılacak malzeme seçilmesi için T-38/NF-5 uçaklarında iç ve dış yapılarında kullanılan aviyonik ekipman kapakları, kokpit panelleri ve anten yapılarında kullanılan parçaların imalat ve onarımı yerli olarak yapılan cam elyaf malzemesi seçilmiştir. Bu malzemenin işlem kolaylığının yanında üretim sonrasında homojen reçine dağılımı olan ve parçalar arası farkların en az olduğu önceden reçine emdirilmiş sistem tercih edilmiştir.

Camın elyafı çok yönlülüğü onu benzersiz bir endüstriyel tekstil malzemesi haline getirmiştir. Kumaş formundaki fiber cam, yüksek mukavemetten yangın direncine kadar

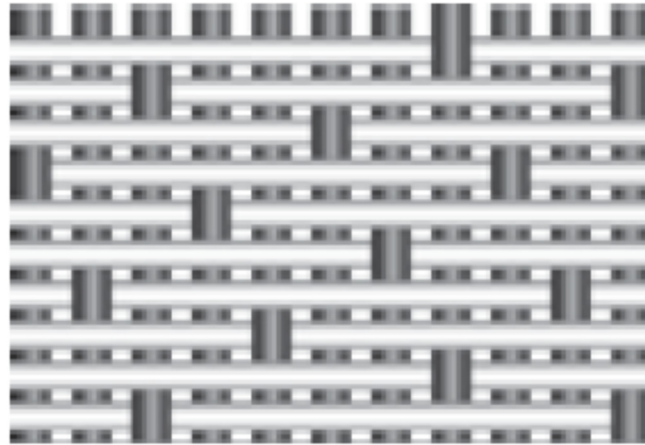
mükemmel bir özellik kombinasyonu sunar. Geniş iplik ebatları ve örgü desenleri, son kullanıcının malzeme performansı, ekonomi ve ürün esnekliğinin en iyi kombinasyonunu seçmesine olanak tanıyan sınırsız tasarım potansiyeli sağlar. Fiber cam, boyutsal olarak kararlı bir mühendislik malzemesidir. Yüksek veya düşük sıcaklığa maruz kaldıktan sonra gerilmez veya küçülmez. Nemi emmez ve suya maruz kaldığında fiziksel veya kimyasal olarak değişmez. Yüksek mukavemet-ağırlık oranı, yüksek mukavemet ve minimum ağırlığın gerekli olduğu uygulamalarda üstün bir malzeme haline getirir. Tekstil formunda, bu mukavemet tek yönlü veya çift yönlü olabilir, tasarım ve maliyette esneklik sağlamaktadır. İnorganik bir malzemedir ve yanmaz veya yanmayı desteklemez. 1000 °F'de yaklaşık yüzde 25 dayanımına sahiptir. Çoğu kimyasalların cam elyafı üzerinde çok az veya hiç etkisi yoktur. İnorganik cam tekstil elyafları küflenmez, çürümez veya bozulmaz. Cam elyafları hidroflorik, sıcak fosforik asitler ve güçlü alkali maddelerden etkilenir. Elektrik yalıtımı için mükemmel bir malzemedir. Düşük nem emme, yüksek mukavemet, ısı direnci ve düşük dielektrik sabiti gibi özelliklerin kombinasyonu, fiber cam kumaşları baskılı devre kartları ve yalıtım vernikleri için bir takviye olarak ideal kılar. Yüksek termal iletkenlik özellikleri ile birlikte düşük bir termal genleşme katsayısı, cam kumaşları asbest ve organik liflere kıyasla ısıyı hızla dağıtan boyutsal olarak kararlı bir malzeme haline getirir.

Referans/örnek malzemelerin üretilmesi için ham malzeme olarak Hexcel HT93 önceden fenolik reçine emdirilmiş 7781 stil E cam bezi kullanılmıştır. (HEXCEL Corp., 2017) 7781 stil cam özellikleri Çizelge 4.1. 7781 Stil cam dokuma özellikleri’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. 7781 Stil cam dokuma özellikleri

Stil (Style)	Dokuma (Weave)	Çözüğü Sayısı (Count Warp)	Atkı Sayısı (Count Fill)	Çözüğü İpliği (Warp Yarn)	Doldurma İpliği (Fill Yarn)	Ağırlık (Weight)		Kalınlık (Thickness)	
						(oz/yd ²)	(g/m ²)	(mils)	(mm)
7781	8H Saten	57	54	ECDE 75 1/0	ECDE 75 1/0	8.81	299	8.6	0.22

8H Saten dokuma; Şekil 4.1’de gösterildiği gibidir ve düz örgü ve 4H saten dokumadan daha esnektir ve takviyeli plastiklerde tipik kavisli yüzeylere uyması daha kolaydır. Bir atkı iplik, yedi çözgü ipliği üzerinde ve birinin altında dokunur.



Şekil 4.1. 8H saten dokuma (HEXCEL Corp., 2017)

Çözü ve Doldurma ipliği ECDE 75 1/0'da terminoloji: "E" Çizelge 4.2. Ağırlık olarak cam birleşimi Ağırlık olarak cam birleşimini karakterize eder. "C", ipliğin sürekli ipliklerden oluştuğunu gösterir. "DE"

Çizelge 4.3. Basit cam iplik telibasit cam iplik telinin çapı gösterir. "75" Temel iplik ipliğinin 1 yb/lb'de 1/100 normal çıplak cam temsil eder. 75 ile 100 çarpımında, bir poundda 15.000 yard sonucuna ulaşılır. (Çizelge 4.2) İkinci sayı-iplikteki temel ipliklerin sayısını temsil eder. "1" rakamı, bükülmüş ipliklerin orijinal sayısını temsil eder. Diagonal ile ayrılmış ikinci basamak, birlikte katlanmış (veya bükülmüş) iplikçiklerin sayısını temsil eder. Bir iplikte kullanılan toplam iplikçik sayısını bulmak için, ilk basamağı ikinci basamakla çarpın (sıfır her zaman 1 olarak çarpılır).

Çizelge 4.2. Ağırlık olarak cam birleşimi

BİRLEŞİM	E CAMI
Silikon dioksit	52-56%
Kadmiyum oksit	16-25%
Alüminyum oksit	12-16%
Boron oksit	8-13%
Sodyum & Potasyum Oksit	0-1%
Magnezyum Oksit	0-6%

Çizelge 4.3. Basit cam iplik teli

İplik Çapı			İplik Teli Ağırlığı		
	Amerika Gösterimi (İnç)	Metrik (mikron)	Amerikan x100=yd/lb	TEX'e göre ayarlanmış*	İplik Sayısı
DE	0.0025	6	75	66	816

*TEX 1000 metre iplik başına gram cinsinden kütledir.

E camı genellikle Cam Elyaf olarak adlandırılır. Dünyadaki en yaygın kullanılan cam elyaf formülüdür. Elektronik uygulamalar için geliştirilmiş olmasına rağmen günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Termoset reçineleri ile birlikte, cam takviyeli plastik üretiminde kullanılır. (POLSER Şeffaf Çatı Örtüleri San. ve Tic. A.Ş., 2019)

HexPly HT93, hava araçları için FST (Fire, Smoke, Toxicity) (Yangın, Duman, Toksikite) yönetmeliklerine uymak için geliştirilmiş cam fiber bezidir. Malzemede çeşitli kumaş takviyeleri vardır. Uçak iç paneller: yan paneller, zemin panelleri, uçak mutfakları, tavan panelleri ve tuvaletler yapısal parçalarının üretiminde kullanılması için üretilmiştir.

Avantajları ve özellikleri

- 1) Kontrollü akış matrisi/reçinesi
- 2) Mükemmel yapışma/birleşme ömrü
- 3) Mükemmel kumaş özelliği
- 4) Kendi kendine sönen FAR25B özelliği
- 5) FAR 25B Değişiklik 66 ve OSU 65/65 özelliği
- 6) İyi sıyırma özelliği
- 7) Çeşitli kür döngüsü 125-150°C
- 8) Vakum torbası, pres ve otoklav için uygundur.

Önceden reçine emdirilmiş bez kür özellikleri:

Sıcaklık (°C)	Süre (Saat)
125	2
135	1,5
150	1

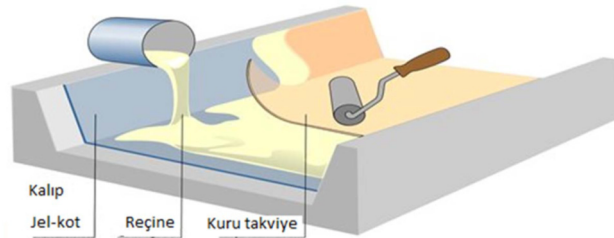
Isıtma rampası 0.5-10°C/dk (Hexcel Corp., 2016)

4.2.2. Test parçalarının üretim yönteminin seçilmesi

Test parçaları için seçilen ham malzemenin şekillendirilip nihai ürüne getirilmesi için 3 farklı üretim yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem sırası ile el yatırması yapılarak parçanın şekli verilmiş, açık kalıplama yapılacağı için vakum çantası yöntemi fazla reçinenin alınması ve daha homojen bir yapının oluşması sağlanmış ve önceden reçine emdirilmiş ham malzemenin matris/reçinesinin kür olması için otoklav yöntemi uygulanmıştır.

4.2.2.1 El yatırması yöntemi

El yatırması yöntemi dokuma veya kırılmış elyaflar ile hazırlanmış takviye kumaşları, hazırlanmış olan kalıp üzerine elle yatırılarak üzerine sıvı reçine dökülmesi ve elyaf katmanlarına emdirilme işlemidir. Bu yöntemi ıslak (wet) ve önceden reçine emdirilmiş el yatırması olarak ikiye ayırılır. Islak el yatırması kuru kumaşların üzerine reçine emdirilerek, diğer yöntemde hazır olarak temin edilen önceden reçine emdirilmiş kumaşların el ile yatırılması ile üretim gerçekleştirilir. (Cripps D. ve Gurit, 2019) Tipik el yatırma uygulaması Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. El yatırması yöntemi

(COMPOSITES UNIVERSAL GROUP , 2017-2019)

El Yatırması Yönteminin Avantajları:

- *Düşük üretim maliyeti
- *Üretilen parçaların boyutlarında teorik olarak kısıtlama olmaması
- *Tasarımda gerektiğinde değişikliklerin kolaylıkla yapılabilmesi
- *Diğer yöntemler arasında en düşük yatırım maliyetine sahip olması
- *Çeşitli renklerde dekoratif yüzey elde edilebilmesi
- *Yerinde kalıplama olanağı

- *Uzun yıllardır yaygın olarak kullanılır.
- *Kolay öğretilir ve uygulanabilir.
- *Geniş tedarikçi seçimi ve malzeme türleri.
- *Yüksek lif içeriği ve spreylendirme işleminden daha uzun elyaf kullanılabılır.

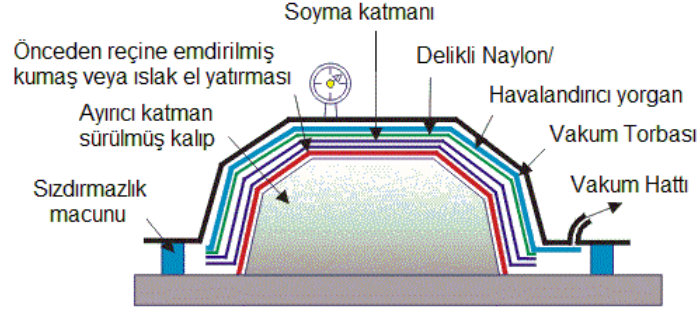
El Yatırması Yönteminin Dezavantajları

- *Tek yüzü düzgün ürün elde edilebilmesi
- *İşgücü yoğun bir proses olması
- *Üretim kalitesinin işçi yeteneklerine bağlı olması
- *Takviye malzemelerinden kalıp özellikleriyle sınırlı şekillerde ürün alınabilmesi,
- *Reçine sistemi içindeki kimyasalların uçuculuğu (Stirenin açığa çıkması)

4.2.2.2 Vakum torbası yöntemi

Genellikle keçe veya dokuma biçimli elyaf, daha önceden hazırlanan kalıp içerisine yerleştirilerek, matrisi oluşturan reçine fırça gibi basit el aletleriyle elyafın üzerine sürülür. İstenilen kalınlık elde edilinceye kadar bu işleme devam edilir, böylece tabakalı kompozit üretilmiş olur. Bu yöntem en uygun reçineler; polyester ve epoksidir. Tutuşmayı engellemek, hafiflik elde etmek, görünümü güzelleştirmek gibi nedenlerden dolayı reçineye değişik dolgu maddeleri katılmaktadır, reçinelerin kalıp yüzeyine yapışmaması için polivinil alkol (PVA), silikon, madeni yağlar ve vaks gibi kalıp ayırıcılar kullanılır. (Aktaş M., 2019)

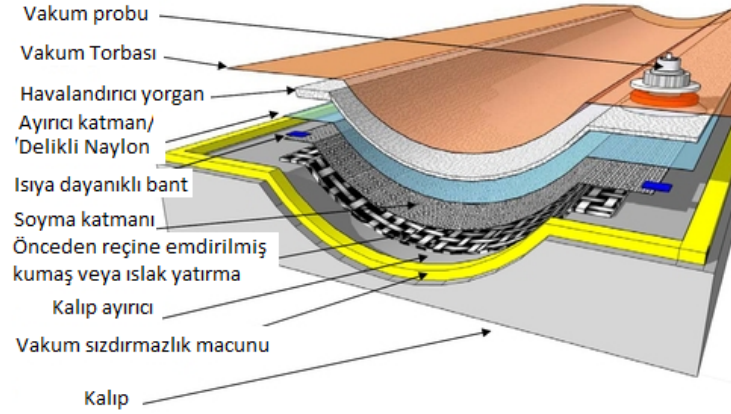
Vakumlu torba kalıplaması elle kalıplamanın gelişmiş bir şeklidir. Büyük karmaşık şekilli parçaların bu teknikle üretilmesi mümkündür. Kompozit malzeme (genellikle geniş sandviç yapılar) önce bir kalıba yerleştirilir, ardından bir vakum torbası en üst katman olarak yerleştirilir. İçerideki havanın emilmesiyle vakum torbası, yatırılan malzemenin üzerine 1 atmosferlik basınç uygulayarak aşağıya çekilir. Sonraki aşamada tüm bileşim bir fırına yerleştirilerek reçinenin kür işlemi için ısıtılır. Bu yöntem sıklıkla elyaf sarma ve yatırma teknikleri ile bağlantılı olarak uygulanır. Kompozit malzeme tamir işlemlerinde de vakum torbası yöntemi kullanılmaktadır. Tipik Vakum çantası Kesit görünüşleri Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Vakum çantası yöntemi kesit görünüşü

Avantajları

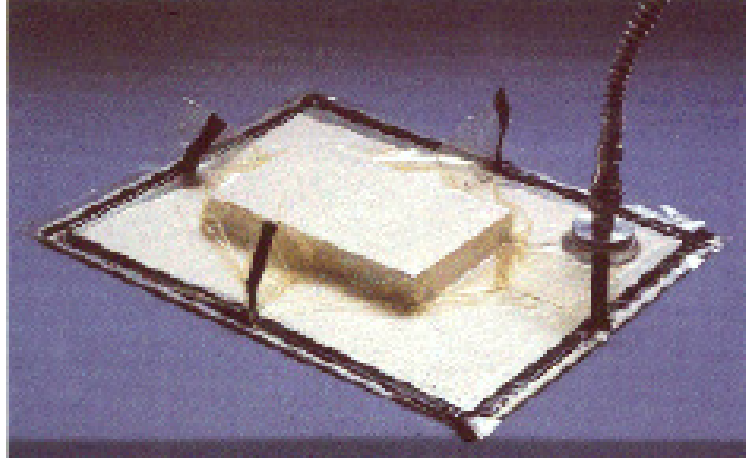
- *Düşük yatırım
- *Düşük maliyetli aletler
- *Mümkün olan büyük yapılar
- *Düşük emisyonlar(uçuculuk)
- *Kalifiye elemanlarla kaliteli parçalar



Şekil 4.4. Vakum torbası yöntemi izometrik

Dezavantajları

- *Doğrudan kalınlık kontrolü yok
- *Bir yüzey pürüzlü
- *Yoğun iş gücü
- *Yavaş işleme
- *Nitelikli işgücüne ihtiyaç vardır.



Şekil 4.5. Tamamlanmış tipik bir vakum çantası yöntemi

İşlem Basamakları:

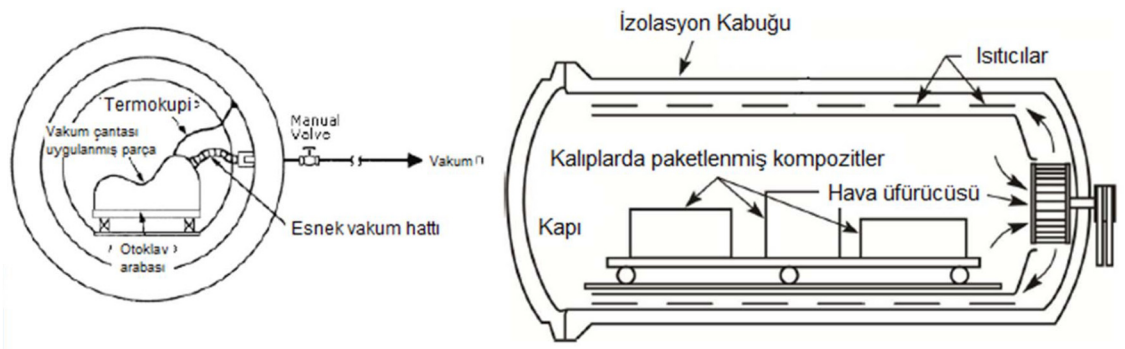
- 1) Kullanılan aletler ve takımlar tiftiksiz ve hav bırakmayan temiz bir bez ile aseton ile temizlenir ve kurumaya bırakılır.
- 2) Kalıp olarak kullanılan malzemenin yüzeyinden malzemenin kür sonrasında kolaylıkla çıkarılması bilmesi için kalıp ayırıcısı uygulanır. Katı veya sıvı formda olan kalıp ayırıcısının yapılacak uygulama ve kullanılacak reçineye göre seçilir. Birkaç kat uygulanan kalıp ayırıcısı ile kalıp yüzeyinde kür sonrasında yapışmayı engelleyici bir katman oluşturulur.
- 3) Kalıp ayırıcısı katman üzerine keçe/kumaş veya iplikler ile takviye malzeme üzerine matris malzemesi reçine dökülür veya önceden reçine emdirilmiş kumaş serilir. Yapılacak malzeme teknik gerekliliklerine göre katmanların nasıl yerleştirileceği ve kat sayısına göre katmanlı yapı oluşturulur.
- 4) Takviye ve matris malzemesi üzerine isteğe bağlı olarak hem reçinenin fazlasını çekmek hem de tek kalıp yüzeyine göre üst kısımda alan yüzeyinde daha düzgün ve boya operasyonlarına hazır yüzey oluşturmak için sıyırma katmanı konur. Bu katman zorunlu olmakla birlikte tercihe göre uygulanabilir.
- 5) Takviye matris malzemesi üzerine veya sıyırma katmanı üzerine delikli naylon (PVC) yerleştirilir. Delikli naylonunda kullanım amacı fazla reçinenin malzeme üzerinden çekilmesi ve vakum yapılması için kullanılmaktadır. Katmanlı oluşturulan veya yapıştırılan

malzemeden fazla reçine ve havanın vakum ile çekilmesi katmanlar arası boşluklar ve homojen olmayan düzensizliklerin engellenmiş olacaktır.

- 6) Delikli naylon malzemesinin üzerine havalandırıcı bez/yorgan (breather fabric) yerleştirilir. Bu malzemenin kullanım amacı yapışma katmanlarının vakumlanma esnasında sert köşe oluşturmamak ve vakumun daha düzenli oluşmasını sağlamaktır.
- 7) Havalandırıcı bez üzerine ve çevresine plastik bir vakum filmi ve çift taraflı yapışkan sızdırmazlık macunları kullanılarak, reçine emdirilmiş yapı çepeçevre dış ortamdan izole edilir. Bu yapının içine veya köşesine vakum portu yerleştirilerek vakum sistemine bağlantı sağlanır. Ayrıca kür prosesinde malzeme sıcaklığı ölçülecekse, yapışmış yapının üzerine veya takım üzerine sıcaklık ölçer ısı çift yerleştirilir ve vakum ortamı kapatılır. Kapatılan vakum ortamı vakum aparatları ile yavaş ve dikkatli bir şekilde vakum altına alınır. Vakum alma sırasında malzeme üzerinde kısıklıklar ve düzensizlikleri engellemek için düzenlemeler yapılır.

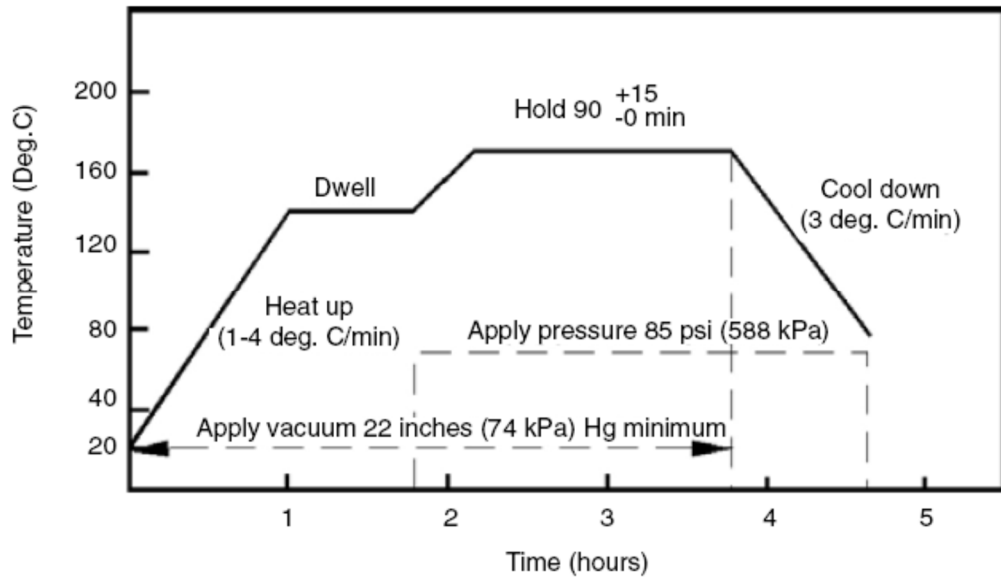
4.2.2.3. Otoklav yöntemi

Otoklav, ısının ve vakumun kontrol edilebildiği basınçlı bir fırındır. Vakum çantası yöntemi ile paketlenmiş bir malzeme ısıtma fırını yerine bir otoklav kullanılabilir. Böylece özel amaçlar için yüksek kalitede kompozit üretebilmek için pişme/kür şartları tam olarak kontrol edilebilir. Bu yöntem diğer kompozit pişirme/kürlenme yöntemlerine göre daha uzun sürede uygulanır ve daha pahalıdır. Tipik otoklav fırını lkesit görünüşü Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Otoklav yöntemi (Anonim, 2019)

Bu yöntemde önce üretimi yapılacak parça için yapışma prosedürüne uygun olarak tabakalama/katmanlama ve vakum torbalaması yapılır. Daha sonra hazırlanan malzeme bir otoklav fırınının içine yerleştirilerek sıcaklık ve basınç altında pişme ve katılaşma gerçekleşir. Otoklav fırınları iç basıncı ve sıcaklığı kontrol edilebilir basınç kaplar şeklinde dizayn edilmiştir. Pişme ve katılaşma belli bir pişme çevrimine (cure cycle) göre gerçekleştirilmektedir. Pişme çevrimini kullanan reçine tipi (reçine ve sertleştirici), üretilecek malzemenin kalınlığı ve geometrisine göre belirlenir. Örnek otoklavda pişirme çevrimi Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Otoklavda tipik pişme/kür çevrimi (*Mazumdar, 2002*)

Otoklav içindeki basınç iki şekilde oluşturulabilir: İlk olarak vakumlu torbalamada olduğu gibi torbalanmış malzemeye iç vakum uygulanarak. İkinci olarak otoklav içinde dış basınç oluşturarak. Dış basınç oluşturmak için tankın içine dışarıdan hava veya azot gazı basılır. Genellikle yüksek pişme sıcaklıklarında herhangi bir tutuşma ve yanmaya karşın azot gazı tercih edilir. Böylece hem iç basınç hem de dış basınç oluşturarak istenen basınç değerleri oluşturulabilir. (*Ataş C., 2019*)

Avantajları

- *Yüksek elyaf hacim fraksiyonlu yapısal kompozit malzemelerin üretimini sağlar.
- *Herhangi bir lif oryantasyonunun üretilmesine izin verir.
- *Prototip parçaları yapmak için uygundur.
- *Otoklav işlemi için takım tasarımı basittir.

- *Basınçlı pişme ve düşük boşluklu (hava kabarcığı gibi) ürünler
- *Büyük bir parçayı veya aynı anda birçok küçük parçayı üretebilme imkanı
- *Basınç ve sıcaklık çok iyi kontrol edilebilir

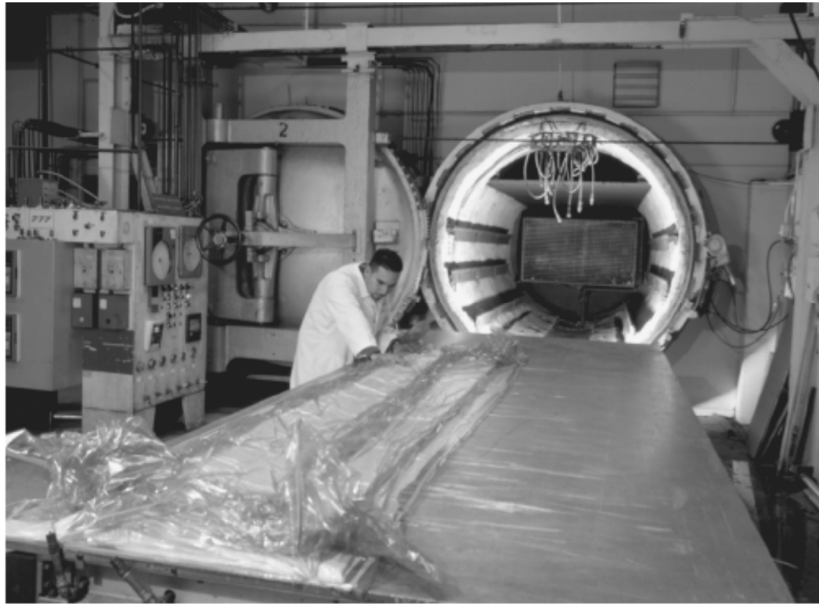
Dezavantajlar:

- *Sistemin özellikle ilk yatırım maliyeti yüksektir.
- *Özellikle termoplastik önceden reçine emdirilmiş bezlerin kullanımında çok yüksek (termoset reçinelere göre) ısı ve basınçlara ihtiyaç vardır.

Uygulama Alanları: Hassas pişme ve katılaşıma gerektiren parçalar, uçak parçaları, tabakalı kompozitler, elektronik endüstrisinde kullanılan termoset esaslı ürünler. Örnek otoklav fırını Şekil 4.8 ve 4.9'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Örnek otoklav fırını



Şekil 4.9. Otoklav içine girecek vakum çantası yapılmış havacılık parçası (Cortesy of Lunn Industries.) (Mazumdar, 2002)

4.2.3. Test parçaları için hata/hasar tiplerinin belirlenmesi

Kompozit malzemelerdeki üretim ve servis ömürleri boyunca tespit edilen hasar tipleri; çizikler, göçükler, delik ve çatlaklar, yapışma kusurları (boşluklar, ayrılmalar), panel kenar hasarları ve yabancı maddelerdir. Bu hasar ve hata tiplerinin tespit edilmesi gereken tahribatsız muayene yöntemleri farklı olmakla birlikte bu çalışmada dahili hasarların belirlenmesi için termografik yöntem kullanılmıştır.

Metal olmayan yapışmış kompozit malzemelerden test edilmesi amaçlanan boşluk, ayrılma, yabancı madde, fiber kırılması/kesilmesi hata/hasarlarının oluşturulmasına karar verilmiştir.

4.2.4. Test parçalarının üretilmesi

Test parçaları üretmek için yapışmış malzemelerin istenmeyen hatalara sebep olmaması için FED-STD-209E'e göre Temiz odalar ve bunlarla ilgili kontrollü ortamlar standardında ve Çizelge 4-4'de gösterilen 300.000 sınıfı toz, sıcak ve nem kontrollü odada üretim yapılmıştır.

Çizelge 4.4. FED-STD-209E Havadaki partikül temizlik sınıfları

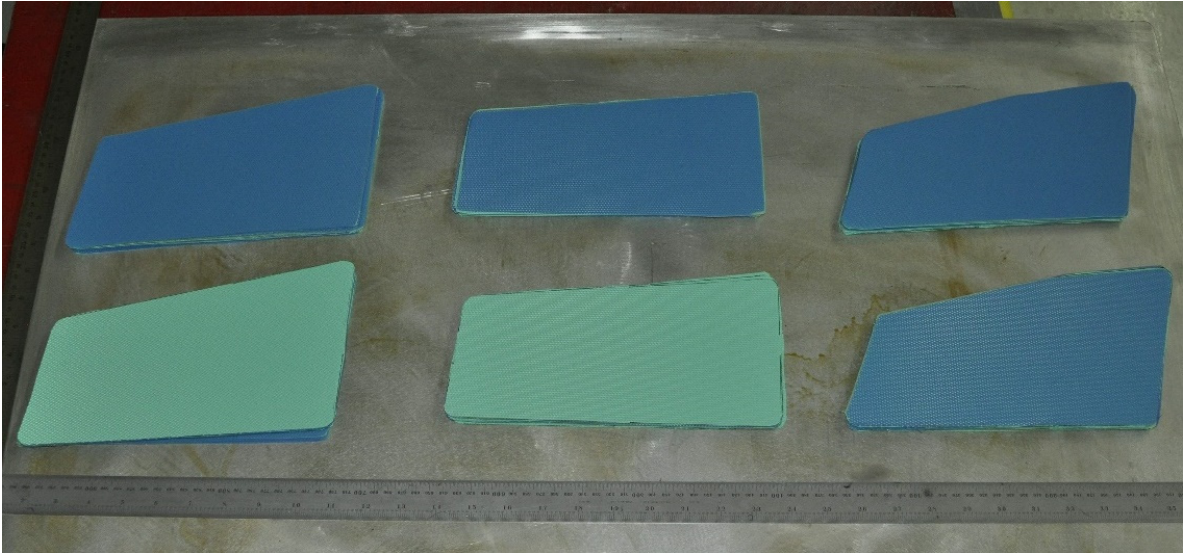
Metrik	İngiliz Standardı	0.5 µm		5 µm	
		m ³	ft ³	m ³	ft ³
6.5	100.000	3.530.000	100,000	24.700	700
	300.000	10.590.000	300.000	74.100	2.100
7		10.000.000	283.000	61.800	1.750

Öncelikle düz panel imal edilmesi için *Şekil 4.10*'da gösterilen 2024-T6 Alüminyum düz plaka kalıbı olarak temizlendikten sonra kalıp ayırıcı Polivaks SV-6 malzemesi uygulanmıştır. Kalıp malzeme yüzey pürüzlüğünden dolayı ayrılmanın daha kolay olabilmesi için 15 dakika arayla ve katlar arasında parlatma yaparak 3 kat kalıp ayırıcı uygulaması yapılmıştır.

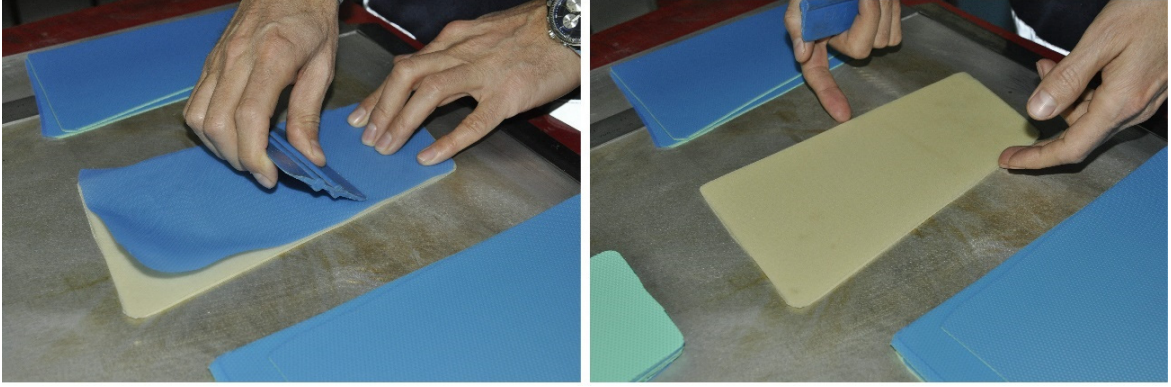


Şekil 4.10. Kompozit İmalatı için Kalıp Malzemesi

Üretim yapılacak malzemeler için -18 derece sıcaklıkta saklanan önceden reçine emdirilmiş cam elyafı malzemesi 4 saat oda koşullarında bekletilip, oda sıcaklığına ulaştıktan sonra Şekil 4.11’de gösterildiği gibi katmanlara kesilmiştir. Kesilen katmanlar istenilen hasar tipine göre koruyucu malzemesi sökülerek 4.12’de ki gibi katmanlı olarak üst üste yerleştirilmiştir. Sonuç olarak katmanları yerleştirilmiş test parçaları Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Kesilmiş Önceden Reçine Emdirilmiş Cam Elyafı Malzemesi (Koruyucu katmanlı)

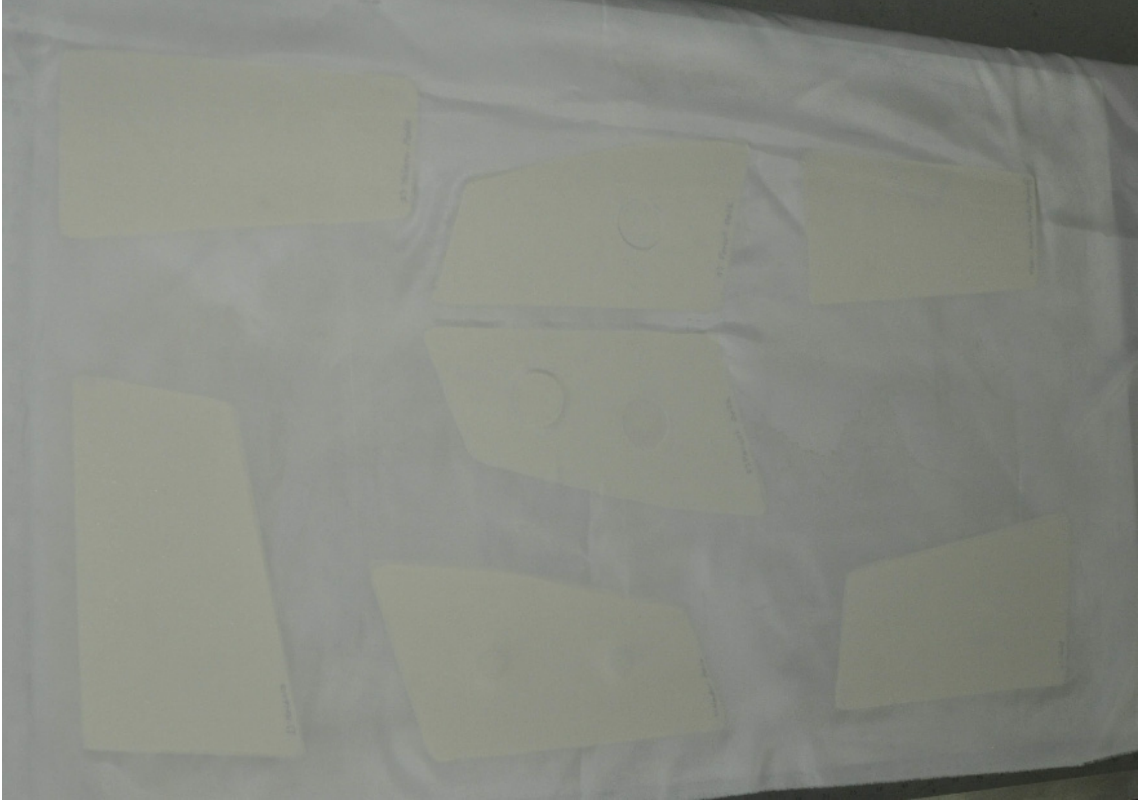


Şekil 4.12. Katmanlı olarak prepreg malzeme yerleştirilmesi



Şekil 4.13. Tüm test parçalarının katmanlı olarak yerleştirilmesi

HexPly HT93 önceden reçine emdirilmiş cam elyaf malzemesinden 6 katman olarak yerleştirilmiştir. Şekil 3.14'te gösterildiği gibi yerleştirilen katmanların üzerine Airtech Release Ply A sıyrma katmanı yerleştirilmiştir.



Şekil 4.14. Katmanlı imalat üzerine sıyırma katmanının yerleştirilmesi

Sıyırma katmanı, dokulu bir yüzey bırakarak kürlenmiş yapının soyulmasını sağlar ve harcanan zamanı azaltır. Kompozit katmanın ikincil bağlanması veya boyanması için yararlıdır, zımpara veya aşınma ihtiyacını ortadan kaldırmak veya azaltmak için gereklidir. Katmanlı yapıların katman en üst katmanlarında oluşan kırışıklıkların azaltılmasında yarar sağlar. Özel uygulamalar için sıyırma katmanı dokuması ve kumaşları değişebilir.

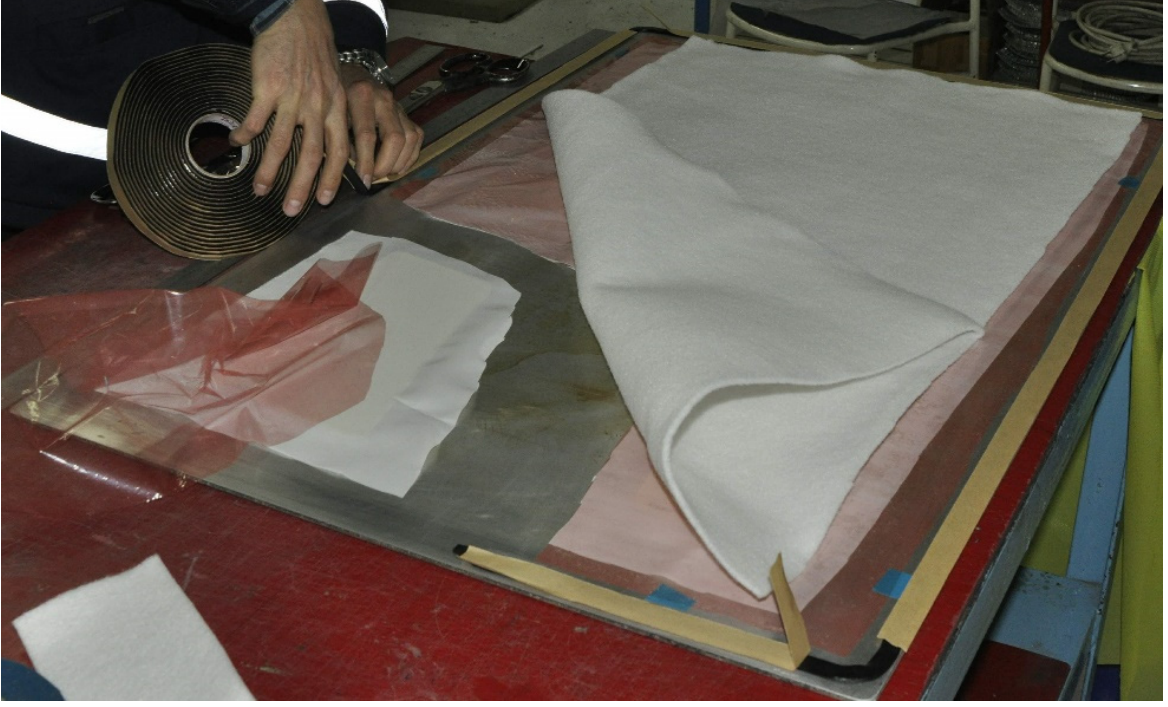
Reçine emdirilmiş cam dokumasındaki kürlenme esnasında fazla reçinenin çekilebilmesi için sıyırma katmanı üzerine Şekil 4.15'te gösterildiği gibi Wrington 5200 RP3 delikli naylon malzemesi yerleştirilmiştir.



Şekil 4.15. Sıyırma katmanı yerleştirilmesi

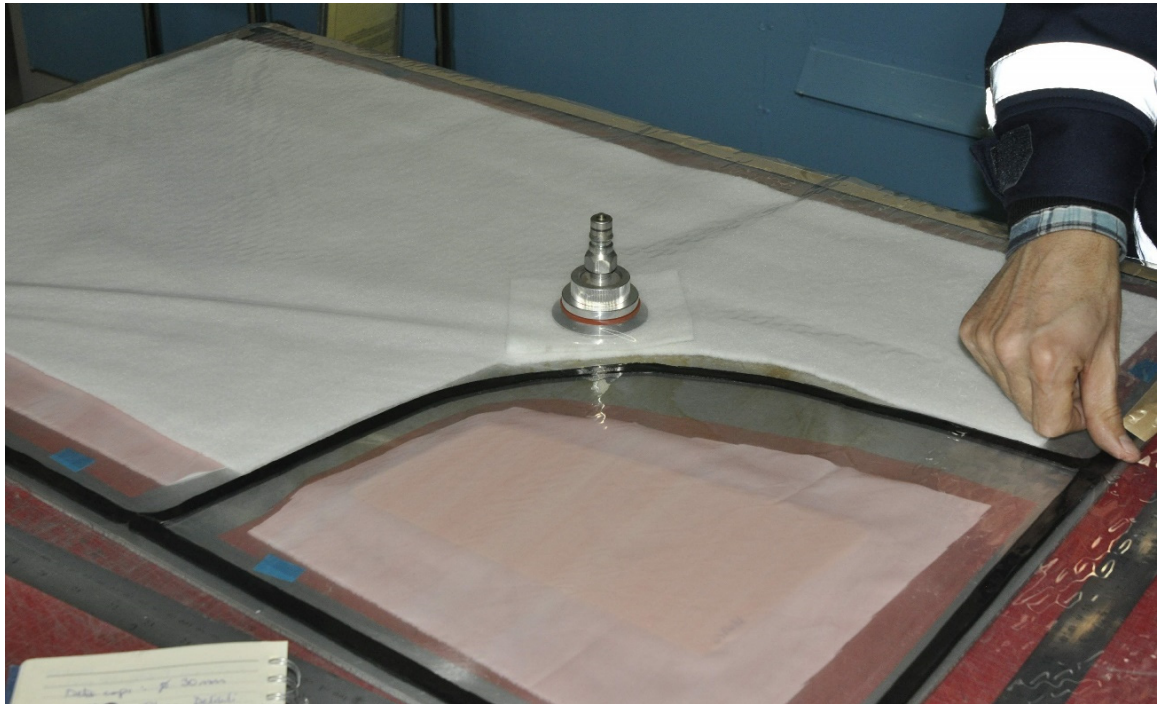
Wrightlon 5200 delikli naylon, karmaşık eğrilikteki yapılara uyum sağlar. 260°C'ye kadar kür sıcaklıklarında dayanıma sahiptir. Çoğu reçine sisteminden kullanılabilir ve doğrudan prepreg malzeme üzerinde kullanıldığında parlak bir yüzey oluşturacaktır. “R P3” ‘deki R kırmızı malzeme olduğu, P3’de malzeme üzerindeki delik boyutu 0.015 inç çapta, ¼ inç aralıkta delilerinin olduğunu belirtir.

Prepreg malzemenin kür esnasında fazla reçinesinin vakum ortamında çekilebilmesi, malzeme üzerinde kırışıklıkların en aza indirilmesi ve vakum torbasının yırtılmasını önlemek için Airweave 10 havalandırma keçesi/yorgani kullanılmıştır. Ayrıca vakum çantası yönteminde dış ortamla sızdırmazlığın sağlanabilmesi için tüm sıralanan malzemelerin çevresine Şekil 4.16’da gösterildiği gibi Tackytape bant yerleştirilmiştir.



Şekil 4.16. Havalandırıcı Keçesi ve Sızdırmazlık Bandı uygulaması

Katmanlı önceden reçine emdirilmiş katmanlı malzemelerin aralarındaki boşlukları almak için vakum altına alınması esnasında gerekli olan Wrightlon 5400 deliksiz vakum naylonu ve VAG valve 402 vakum portu uygulaması Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



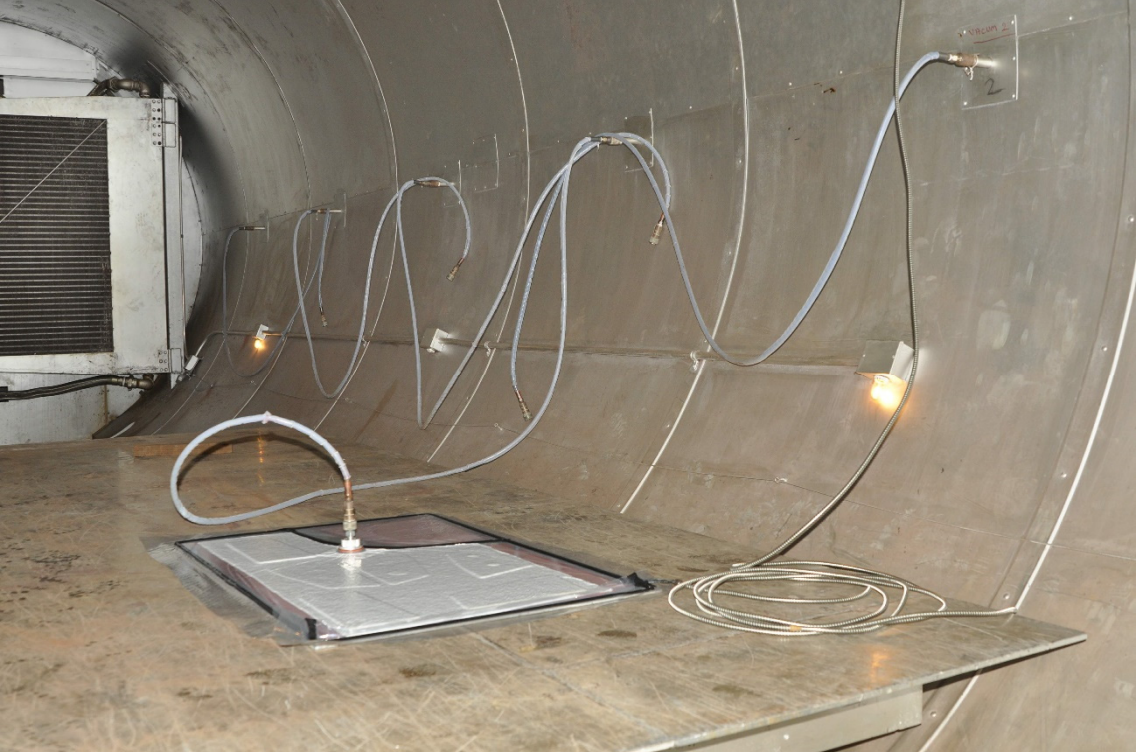
Şekil 4.17. Vakum Naylonu uygulaması

Vakum antası katmanları tamamlandıktan sonra Şekil 4.18’de gösterildiği gibi vakum kaynağı/pompası kullanılarak 25.4inHg vakum altına alınmıŐ ve katmanlar arasında hava çekilmiŐ ve kr döngüsüne hazır paketlenmiş malzeme hazırlamıŐtır.



Şekil 4.18. Vakum uygulaması

Hazırlanmış olan vakum çantası yöntemindeki malzemeler Tenny Engineering Otoklav fırınında 5 C°/dk ısıtma/soğutma hızı ile 150 C°’de 1 saat krlendirilmiŐ ve oda sıcaklığına sođutulmuŐtur. Otoklav fırınında kr sresinde 30 psi basınlandır, 25 inhg vakum sağlanmıştır ayrıca kalıp malzeme üzerine yerleştirilen termokupi vasıtası ile kr döngüsü sıcaklığı takip edilmiştir. Şekil 4.19’da kr öncesinde otoklav fırınına yerleştirilen malzemeler ve Şekil 4.20’de kr sonrasındaki malzemeler gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Otoklav fırınına yerleştirilmiş vakum çantasındaki test malzemeleri



Şekil 4.20 Kür döngüsü sonrası vakum çantasındaki test parçaları

Kür döngüsü sonrasında vakum çantası açılıp sarf malzemeler test parçalarından söküldüğünde Şekil 4-21’de gösterildiği gibi nihai test parçaları üretilmiştir.



Şekil 4.21. Kürlendirilmiş test parçaları

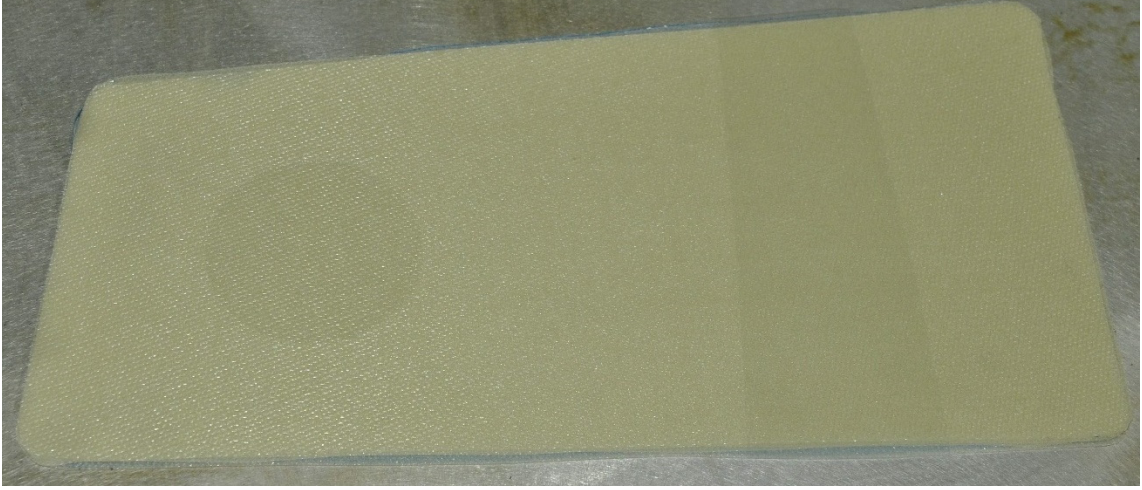
Üretilen parçaların hasar tanımları şu şekildedir:

1. Test Parçası: (Hatasız kabul edilen) Şekil 4.22’de kür sonrası durumu gösterilen hasarlı ve hasarsız panellerin karşılaştırılabilmesi için seçilmiş, doğru karşılaştırma parçasıdır.



Şekil 4.22. Kürlendirilmiş birinci test parçası

2. Test Parçası (Yabancı Madde-PVA film): Katmanlı cam elyaf malzemelerin koruyucu PVA filmi ya da vakum çantası naylonu tabakasının üretim aşamasında unutulmuş veya malzemedan üretim aşamasında ayrılmamış olduğunu benzetim yapmak amaçlanmıştır. Şekil 4.23'de kür öncesinde ve 4.24'de kür sonrası test parçası gösterilmektedir.

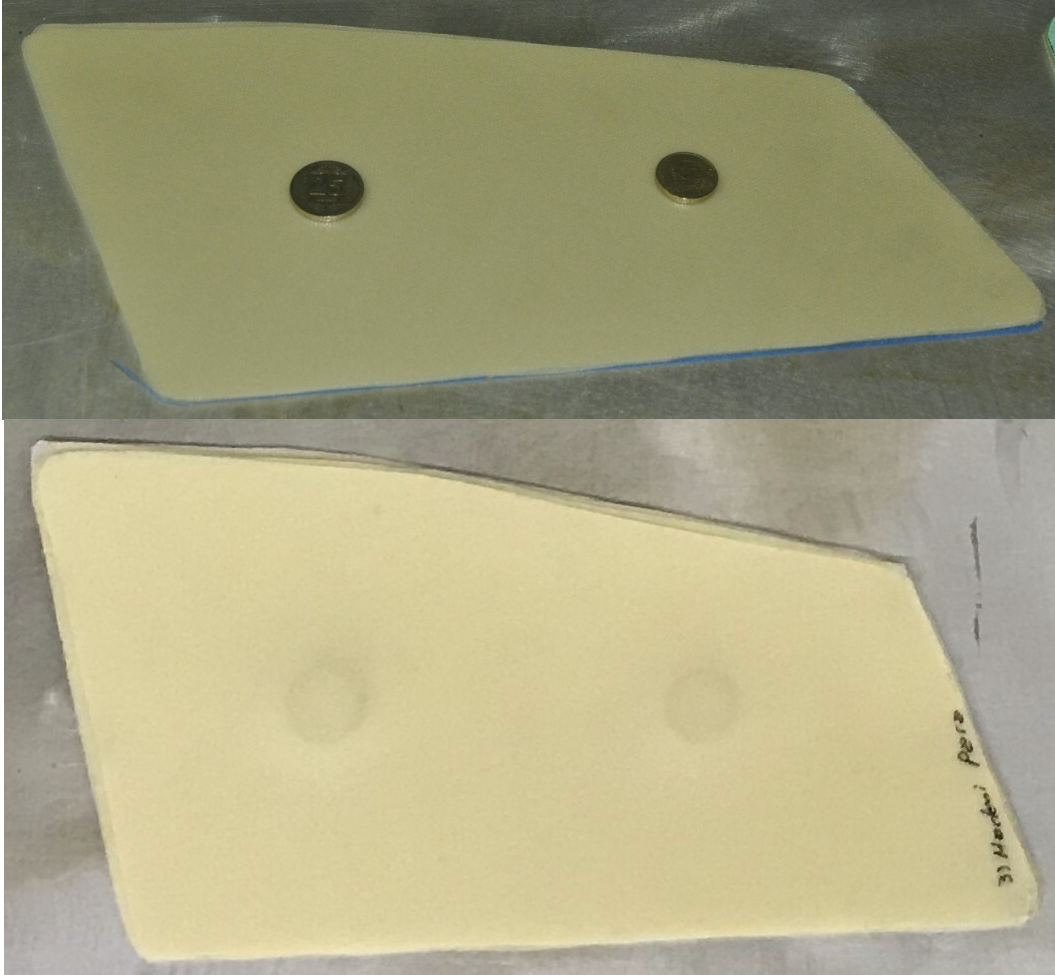


Şekil 4.23. İkinci test parçasının üretim aşaması



Şekil 4.24. Kürlendirilmiş ikinci test parçası

3. Test Parçası (Yabancı Madde-Madeni Para): Farklı ısıl iletkenliğe sahip malzemelerin katmanlı yapı arasında tespit edilebilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Şekil 4.25'te kür öncesinde ve Şekil 4.26'da kür sonrası test parçası gösterilmektedir.

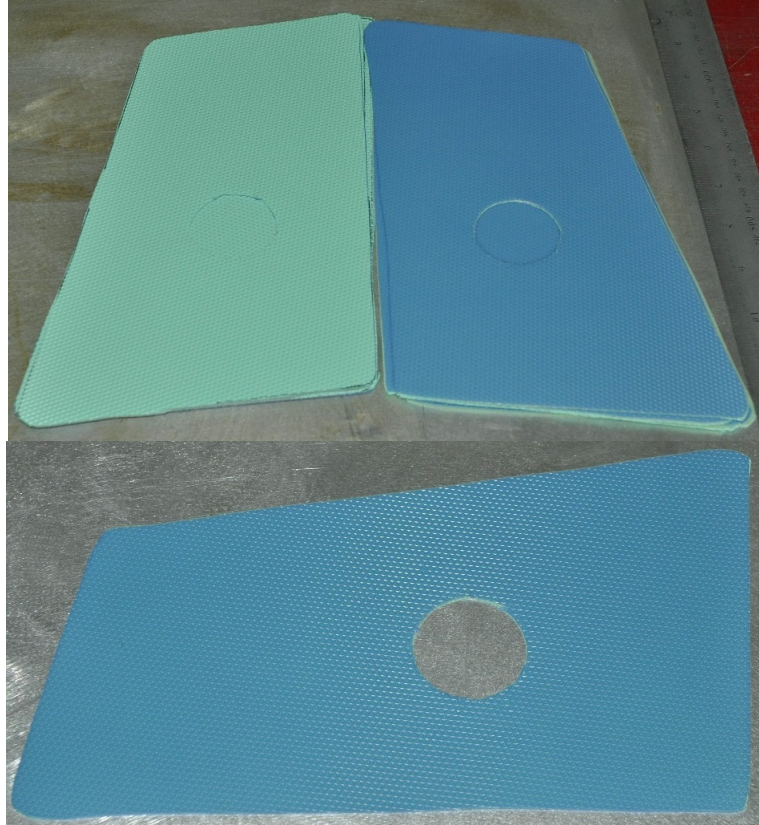


Şekil 4.25. Üçüncü test parçasının üretim aşaması



Şekil 4.26. Kürlenmiş üçüncü test parçası

4. Test Parçası (Delik/ayrılma ara katmanda, vakum uygulanmamıştır): Katmanlı kompozit malzeme imal ederken vakumsuz ve basınç altında (otoklav basıncı) bilerek bırakılan katmanların yapışması engellemek ve boşluk/ayrılma kusuru ortaya çıkarmak için vakumsuz olarak imal edilmiştir. Şekil 4.27’te kür öncesinde ve Şekil 4.28’da kür sonrası test parçası gösterilmektedir.

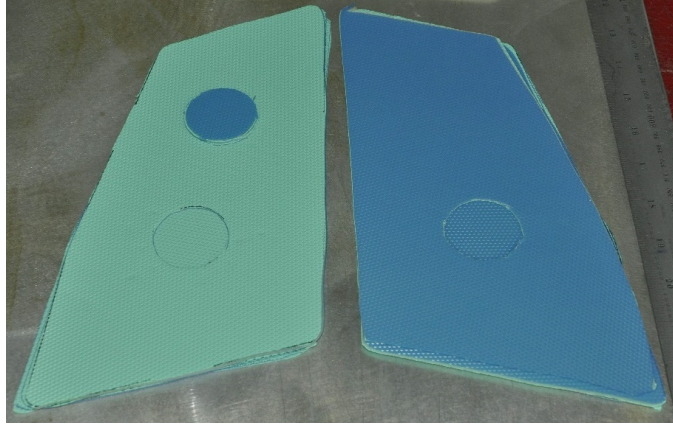


Şekil 4.27. Dördüncü test parçası üretim aşaması



Şekil 4.28. Kürlenirilmiş dördüncü test parçası

5. Test Parçası: Fazla ve eksik katman oluşturulmuştur. Katmanlı imalat aşamasında eksik ve fazla katmanlar vakum ve basınç altında birbirlerine yapışacağı ön görülmüş ve bu yüzde tam ortasından iki parça olarak imal edilmiştir. İki parça olarak imal edilen test parçasının ikinci yapışma prosesi ile birleştirildiğinde ortaya çıkabilecek yapışmamama/homejen yapışmama kusurları sınamak için bu parça imal edilmiştir. Ayrıca ara katmandan kesip çıkarılan daire şeklinde parça ara katmana ilave edilip aynı malzemeden kalınlık farklarının tespit edilmek için bir hasar çeşidi düşünülmüştür. İki parça halinde otoklavda kürlendirilen malzeme, otoklav sonrasında tekrardan birbirlerine yapıştırılmış ve oda koşullarında kürlendirilmiştir. Şekil 4.29’te kür öncesinde ve Şekil 4.30’da kür sonrası test parçası gösterilmektedir.



Şekil 4.29. Beşinci test parçasının üretim aşaması

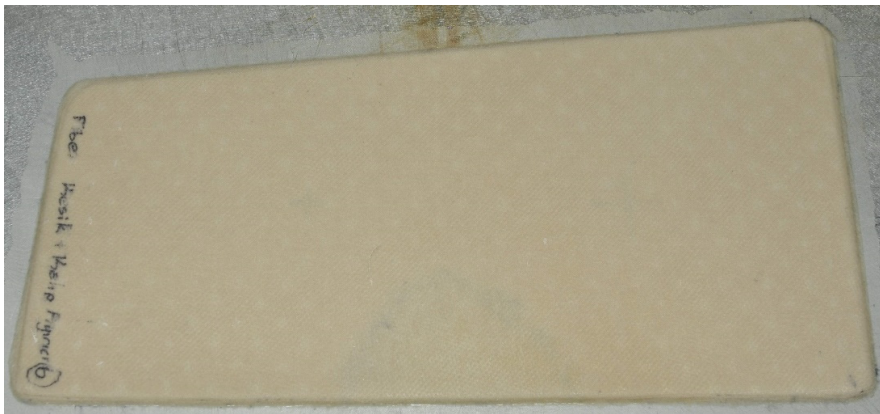


Şekil 4.30. Kürlendirilmiş beşinci test parçası

6. Test parçası kesik fiber ve yabancı madde (kalıp ayırıcı): Kalıp ile katmanlı yapı arasında, kürlenme sonrasında kalıptan kolay ayrılması için sürülen kalıp ayırıcının katmanlar arasına sızdığında durumunu ve dokuma kumaşındaki kesik ve kırılmaların simule etmek istenmiştir. Şekil 3.41’te kr öncesinde ve Şekil 3.42’da kr sonrası test parçası gösterilmektedir.



Şekil 3.41. Altıncı test parçasının üretim aşaması



Şekil 3.42. Kürlendirilmiş altıncı test parçası

4.3. Veri Toplama Araçları

Termografik muayenenin uçak kompozit yapılarında kontrolünün yapılabilmesi için çeşitli ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Eğer termal uyarım açısından pasif olan test parçaları kontrol edilecek ise termal kameradan sıcaklık değişimlerinin gözlemlenebilmesi, ısı uyarım için harici bir ısı kaynağı gerekmektedir. Dijital olarak elde edilen ve geri dönük olarak tekrarlayan bir şekilde kontrol yapılabilmesi ve saklanabilmesi için termal kamera yazılı, bilgisayar ve verilerin saklanması için depolama birimi gerekmektedir. Tüm bu işlemleri yapılırken, kameranın sabitlenmesi için kamera ayağı, ısı kaynakları için gerekli ayak ve kablo bağlantıları gibi yardımcı ekipmanlardan yararlanılmıştır.

4.3.1. Termal kamera

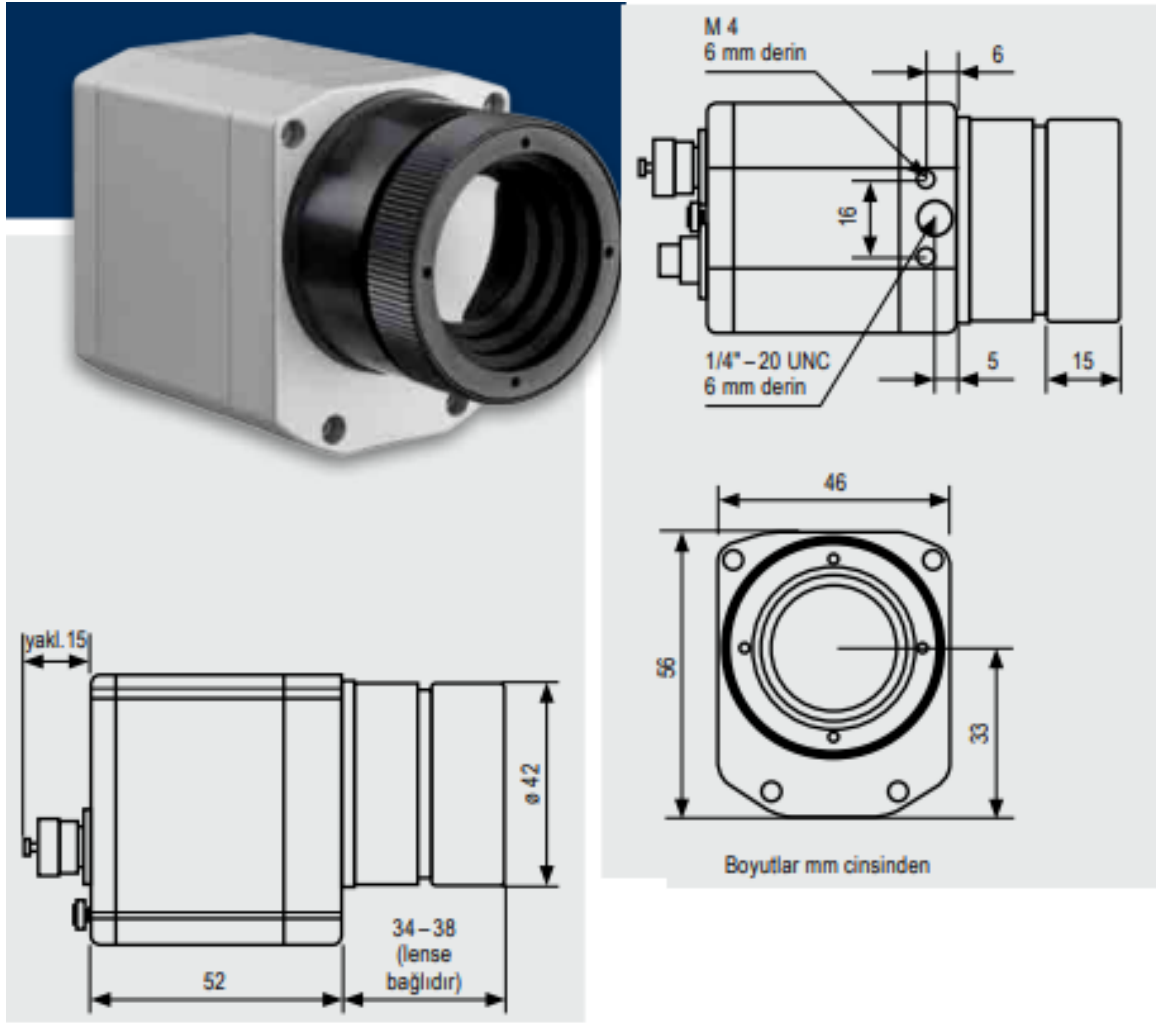
Termoradyografik muayene kontrol için Optris marka PI400O38T1500 model termal kamera kullanılmıştır. Şekil 4.33’de kullanılan termal kamera görseli ve boyutları ve Çizelge 4.5’te teknik özellikleri gösterilmektedir.

IR kameranın önemli parametreleri

- Sıcaklık aralığı: -20°C’den 1500°C’ye
- Spektral aralık: 7.5 ile 13 μm
- Çerçeve hızı: 80 Hz
- Optik çözünürlük: 382 x 288 piksel

IR kameranın avantajları

- Hızlı online termal kameradır.
- 80 mK (PI400) çok yüksek termal hassasiyet vardır.
- 320 g ağırlığındadır. Sınıfının en küçük kamerasıdır. (46 x 56 x 90 mm³)
- Değiştirilebilir lensler, endüstriyel aksesuarlar ve yazılım paketi, video ya da şipşak fotoğraf kaydetme özelliği, geniş termografik analizin (çevrimiçi, çevrimdışı) yanı sıra tarama modu bulunmaktadır.



Şekil 4.33. Optris PI 400 Termal Kamera (Optris GmbH, 2019)

Çizelge 4.2. Optris PI 400 Termal Kamera Teknik Verileri (Optris GmbH, 2019)

Teknik veriler

Temel model		PI 400
Tip		IR
Dedektör		FPA, soğutulmamış (25 µm x 25 µm)
Optik çözünürlük		382 x 288 Piksel
Spektral aralık		7,5 – 13 µm
Isı aralıkları		-20 °C ... 100 °C, 0 °C ... 250 °C, 150 °C ... 900 °C, ilave aralık: 200 °C ... 1500 °C (PI 400 için opsiyon)
Görüntü frekansı		80 Hz
Optikler (FOV)		38° x 29° FOV / f = 15 mm veya 62° x 49° FOV / f = 8 mm veya 13° x 10° FOV / f = 41 mm
Termal duyarlılık (NETD)		PI 400: 0,08 K PI 400: 0,08 K PI 400: 0,1 K
Sistem hassasiyeti		±2 °C veya ±%2, daha büyük olan değer geçerlidir
PC arayüzleri		USB 2.0
Proses arayüzü (PIF)	Standart PIF	0 – 10 V giriş, dijital giriş (maks. 24 V), 0 – 10 V çıkış
	Endüstriyel PIF (opsiyonel)	2 x 0 – 10 V girişler, dijital giriş (maks. 24 V), 3 x 0 – 10 V çıkışlar, 3 x röle (0 – 30 V / 400 mA), Fail-Safe rölesi
Ortam sıcaklığı (T _{Umğ})		PI 400: 0 °C ... 50 °C
Depo sıcaklığı		PI 400: -40 °C ... 70 °C
Bağıl hava nemi		%20 – 80, yoğuşmasız
Gövde (büyüklük/ koruma sınıfı)		46 mm x 56 mm x 90 mm / IP 67 (NEMA 4)
Ağırlık		320 g, lens dahil
Şok/ vibrasyon		Şok: IEC 60068-2-27 (25 g ve 50 g) Vibrasyon: IEC 60068-2-6 (sinüs biçimli)/ IEC 60068-2-64 (geniş bant gürültüsü)
Statif yuvası		1/4 - 20 UNC
Gerilim beslemesi		USB üzerinden
Teslimat kapsamı (standart)		<ul style="list-style-type: none"> • USB kamera ile 1 lens • USB kablo (1 m) • Masa tripot • PIF kablo ile terminal blok (1 m) • optris® PI Connect yazılım paketi • Alüminyum çanta (PI 400)

4.3.2. Isı kaynağı, ısı plakası

Kontrol edilecek ısı olarak pasif malzemedeki ısı dağılımının belirlenebilmesi için en basit yöntem olarak Şekil 3.34’te gösterilen ısı plakası kullanılmıştır. Bir ısı plakası üzerine metal düz bir yüzey yerleştirilip, ısı kaynak ile malzeme arasında ısı iletken malzeme yerleştirilmiştir. Isıl plaka 220 volt elektrik ile çalışan bir ısı kaynağıdır.



Şekil 4.34. Isı plakası

4.3.3. Bilgisayar ve yazılım.

Termoradyografik kontrolün yapılabilmesi için Optris marka PI400 kameranın kullanılabilmesi ve saha kullanılabilirliğinin sağlanabilmesi için Şekil 4-35’te görseli olan ve teknik özellikleri Çizelge 4.6’da verilen DELL N3010 dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. Bilgisayarın usb bağlantısı yardımı ile Termal kamera bağlanmıştır.

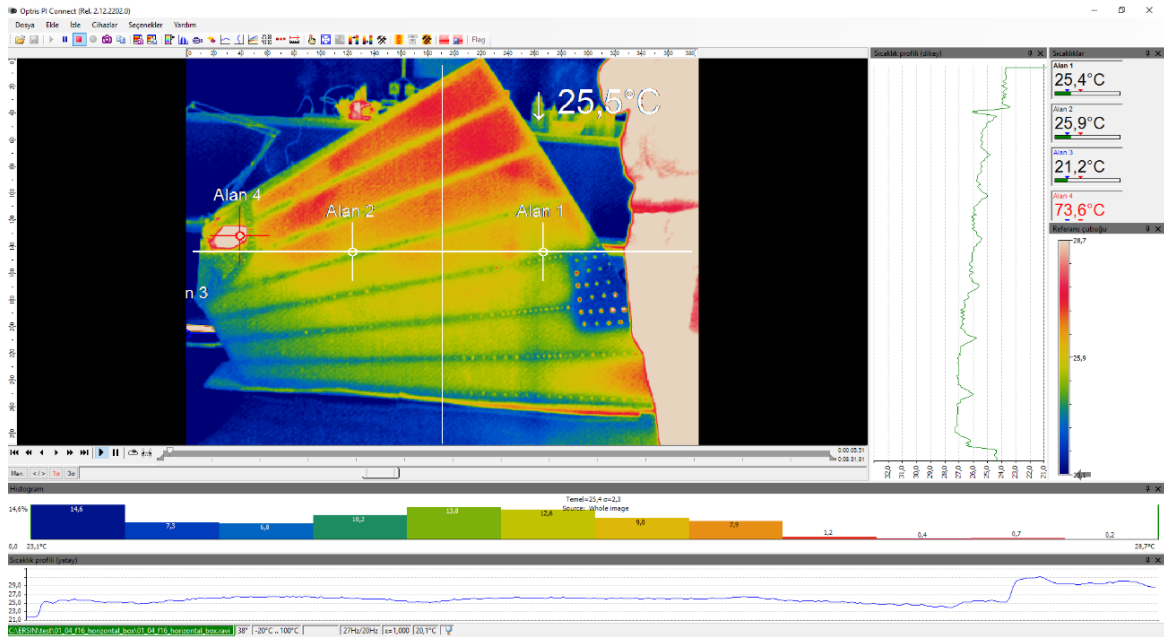


Şekil 4.35. Dell N3010 Dizüstü Bilgisayar

Çizelge 4.3. Dell N3010 Teknik Özellikleri

İşlemci	Intel Core TM i5 480m Processor (2.66GHZ/3MB cache)
İşletim Sistemi	Windows 10 Home 64 bit
Hafıza	4 GB (2x2 GB) DIMM DDR 1333Mhz
Çip set	Mobile Intel 5 Series Express Chipset
Ekran kartı	ATI Mobility Radeon HD 5470 – 1GB
Ekran	13.3 widescreen HD WLED (1366x768) + 2 x Samsung 22'
Sabit Hafıza	250 GB SSD Sandisk
Ports	2 x USB 2.0 + combo E-SATA/USB 2.0

Optris marka termal kamera için farklı yazılımlar kullanılabilmekte olup, bu çalışmada kameranın kendi yazılı olan ve Şekil 4-36'da arayüz görseli gösterilen Optris PI Connect (Rel. 2.12.2202.0) kullanılmıştır.



Şekil 4.36. Optris PI Connect Yazılım Arayüzü

Yazılım üzerinde orta bölgede yapılan termal kontrol görseli vardır, alt ve sağ yanda belirlenen doğrusal çizgilerdeki sıcaklık ölçüm histogramları bulunmaktadır. Ayrıca Belirlenen 4 farklı noktadaki sıcaklık değerlerini gösterilmektedir.

4.3.4. Yardımcı ekipmanlar

Analiz gerçekleştirilmesi sırasında bilgisayar, termal kamera, test parçası ve ısıtıcının konumlandırılması, belirli bir şekilde sabitlenmesi amacıyla yardımcı ekipmanlar kullanılmıştır bunlar sırası ile;

- 1) Termal kamera sabitlenmesi amacıyla Manfrotto tripod
- 2) Isıtıcı için ısıl iletken yüzey plakası, termal macun
- 3) Bilgisayar ve termal kamera arasında bağlantı için farklı uzunluklarda usb kablosu.

4.4. Verilerin Toplanması

Üretilen test parçaları ve hazırlanan veri toplama araçları ile hazırlanan test ortamında TRK gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan Test düzeneği Şekil 3-37'de gösterilmiştir.

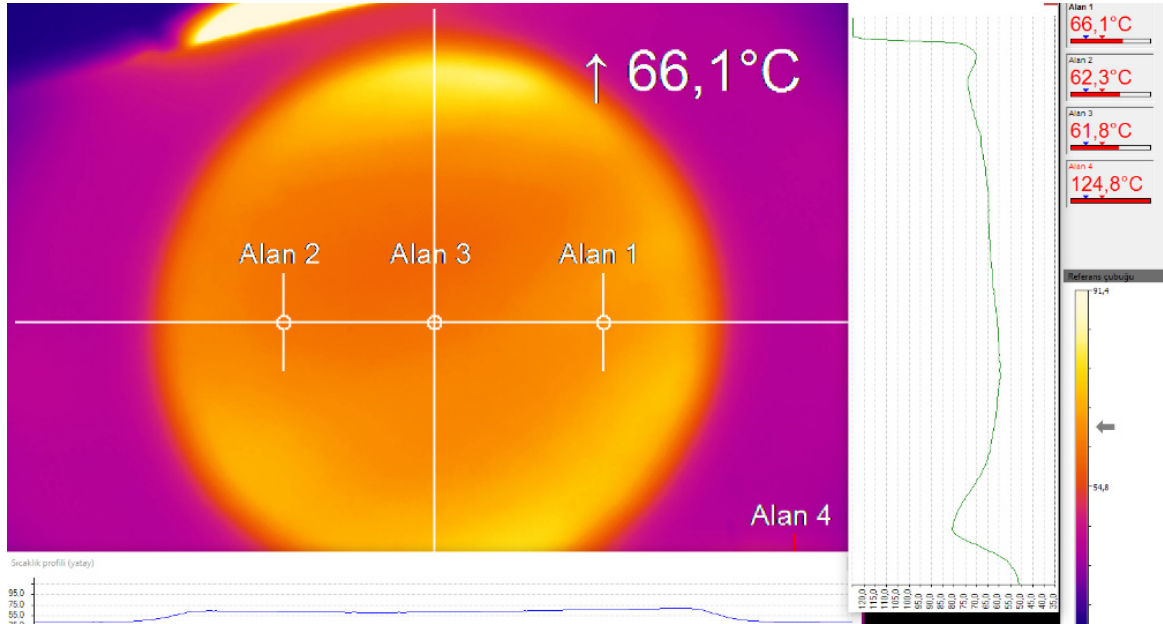


Şekil 4.37. Test Düzeneği

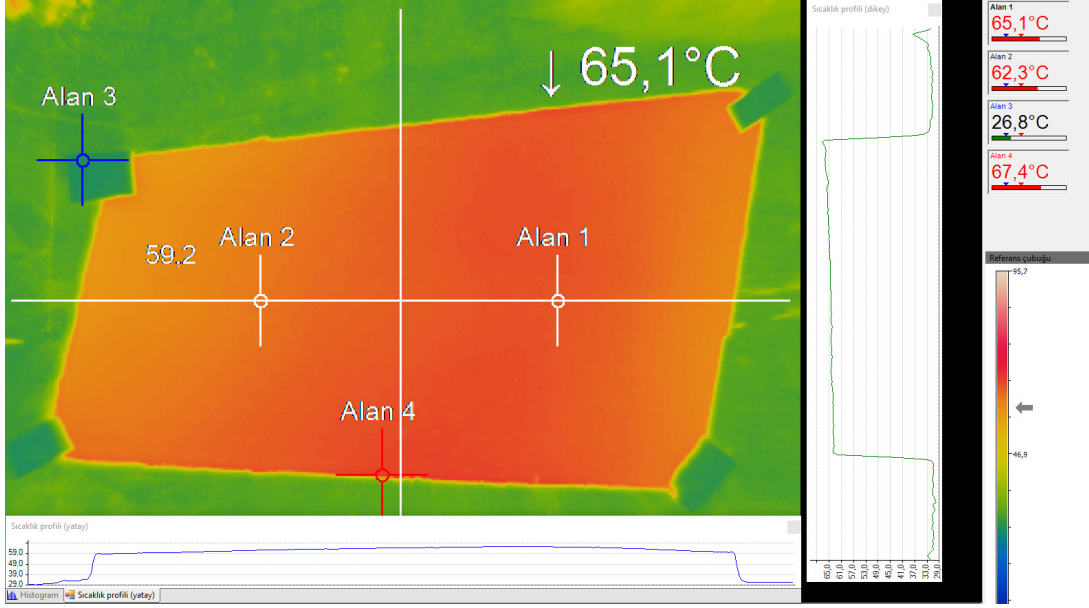
Hazırlanan test düzeneğinde 3 farklı TRK gerçekleştirilmiştir. İlk TRK üzerine test parçası koyulup ısı plakası çalıştırılmış ve malzeme üzerindeki ısı akışı kaydedilmiştir. Bu kontrol sırasında malzeme üzerindeki hata tespiti sadece ısı plakasının yuvarlak yüzeyinde alanda tespit edilmiştir. Yuvarlak alanlar haricindeki alanların kontrolü esnasında malzeme üzerinde ısı dağılımı homojen duruma geldiğinden hata tespiti yapılamamıştır. İkinci TRK kontrolde ısı plakası ısıtma alanı genişlemesi için yüzey plakası önceden ısıtılmış ve ısınan yüzey plakası üzerine test parçası konulmuştur. Böylelikle test parçası üzerindeki tüm alanın TRK'sı yapılabilmektedir. Ancak 1. ve 2. Kontrollerde malzeme yüzey düzgünlüğü ve çarpıklığından kaynaklanan test parçası ve yüzey plakası arasındaki boşluktan dolayı test parçası tüm kontak yüzeyi sağlanabilmesi amacıyla yüzey plakası üzerine termal macun uygulaması yapılmıştır. Termal macun uygulaması sonrasında test parçaları üzerinde daha homojen ısı dağılımı gerçekleştirilmiştir.

1) Birinci test parçası için kontrol (Hatasız kabul edilen)

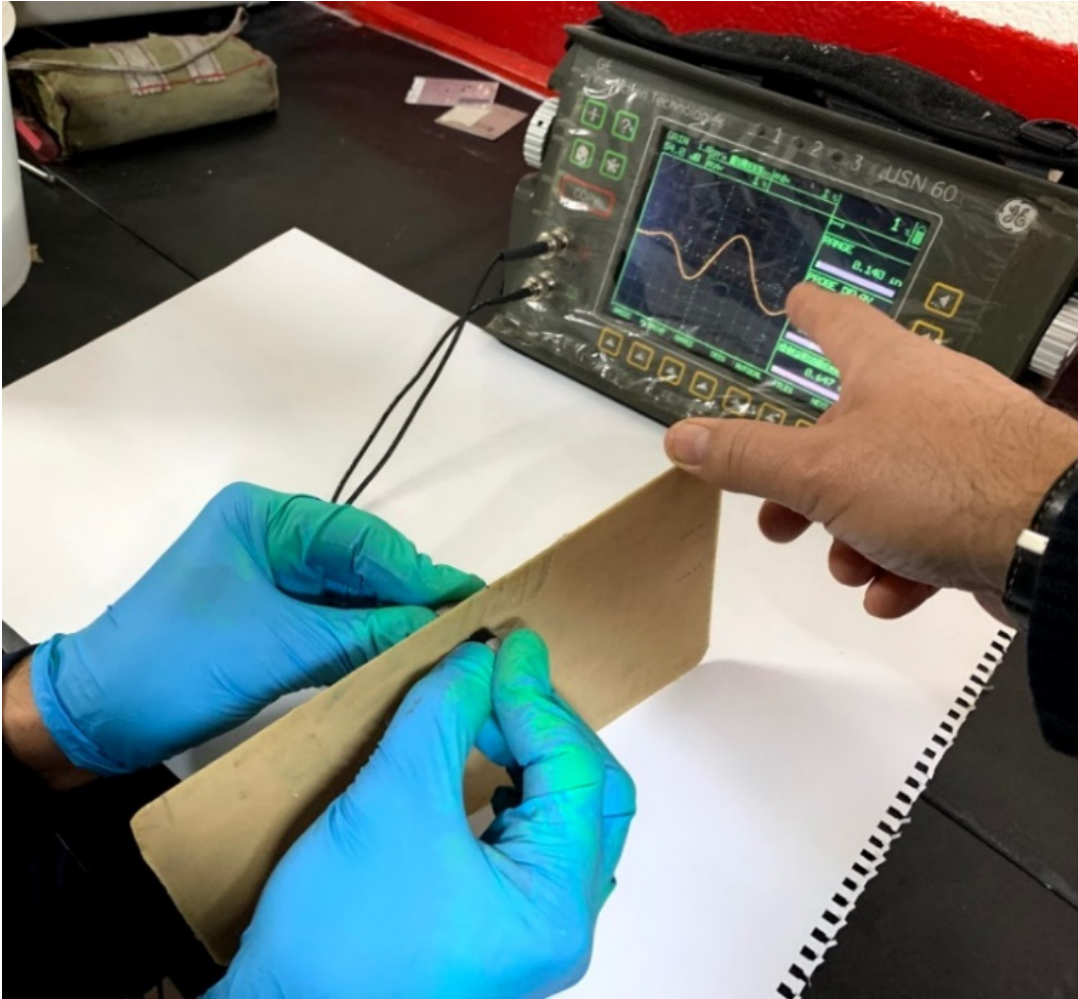
Hatasız kabul edilen birinci test parçasının termografik ilk kontrol sonucu Şekil 4-38'de, ısı plakası ve sabitleme bantları kullanılarak ikinci kontrol Şekil 4.39'da ve hatasızlığını kontrol etmek için bir diğer NDI yöntemi ile ultrasonik kontrol yöntemi ile Şekil 4.40'da gösterildiği gibi kontrol gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.38. Birinci Test Parçası Termografik 1. Kontrolü



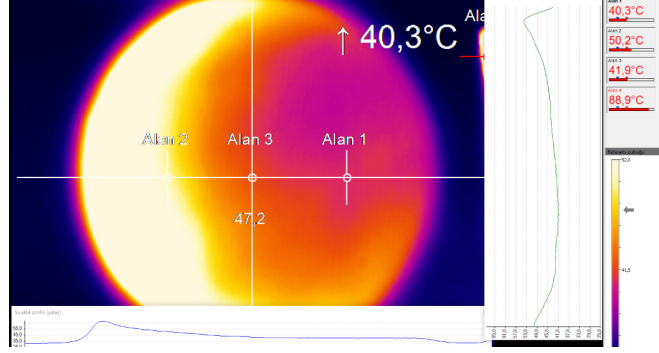
Şekil 4.39. Birinci Test Parçası Termografik 2. Kontrolü



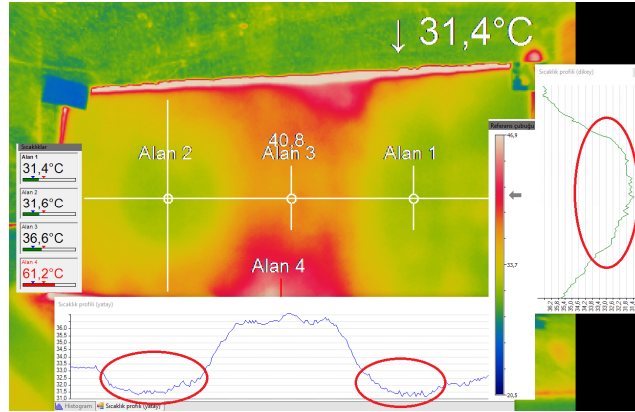
Şekil 4.40. Birinci Test Parçası Ultrasonik Kontrolü

2) İkinci test parçası için kontrol (Yabancı madde PVA film)

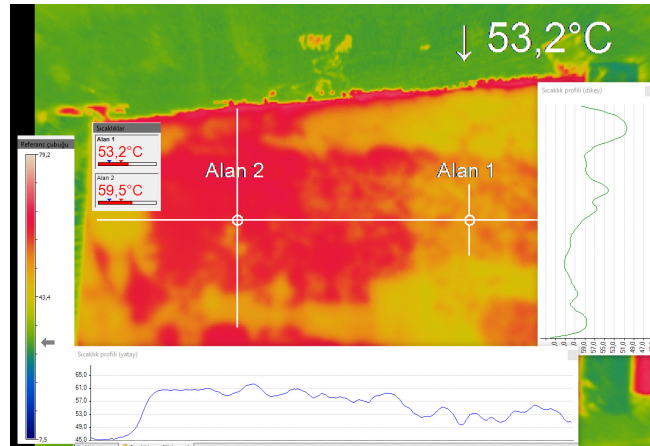
Üretimde PVA film ile üretilen ikinci test parçasının ilk kontrolü Şekil 4.41, ısı plakası kullanılarak ikinci kontrolü Şekil 4.42 ve termal macun uygulaması yapılarak gerçekleştirilen üçüncü termografik kontrol sonucu Şekil 4.43'te gösterilmiştir.



Şekil 4.41. İkinci Test Parçasının Termografik 1. Kontrolü



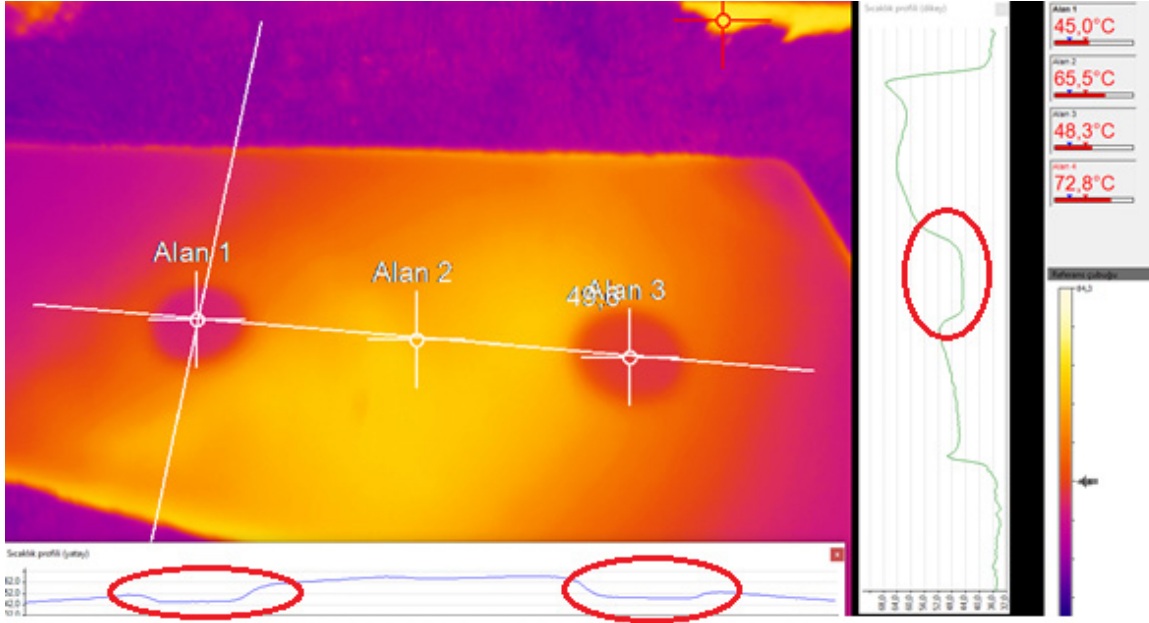
Şekil 4.42. İkinci Test Parçasının Termografik 2. Kontrolü



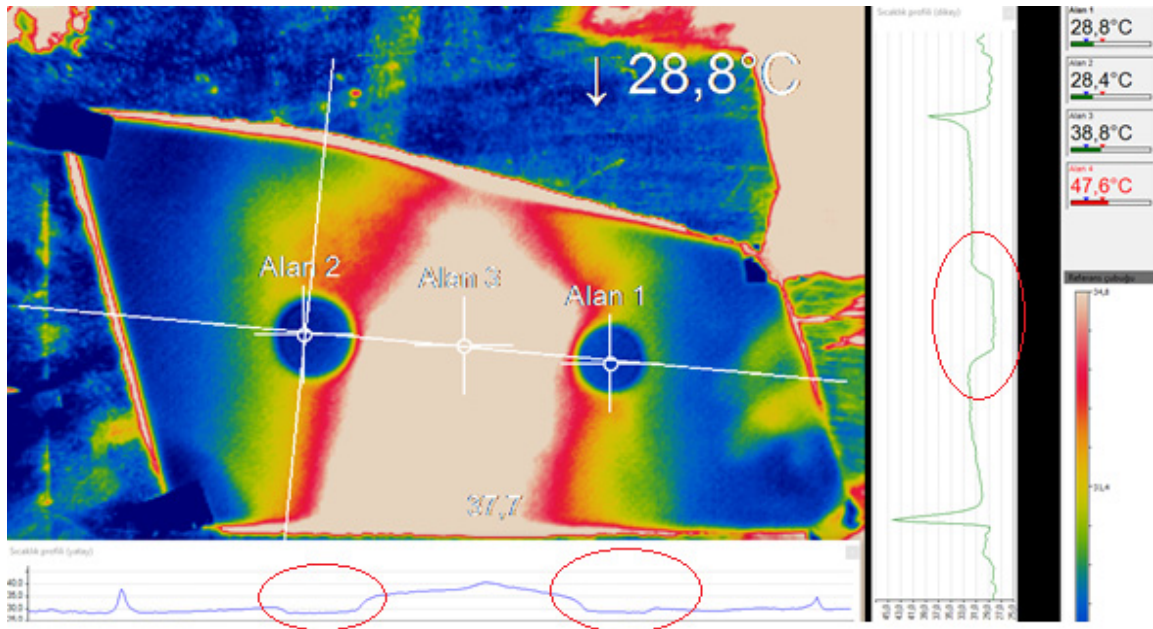
Şekil 4.43. İkinci Test Parçasının Termografik 3. Kontrolü

3) Üçüncü test parçası için kontrol (Yabancı madde – madeni para)

Üretiminde madeni para ile üretilen üçüncü test parçasının ilk kontrollü Şekil 3.44 ve ısı plakası kullanılarak ikinci kontrolü Şekil 3.45'te gösterilmiştir.



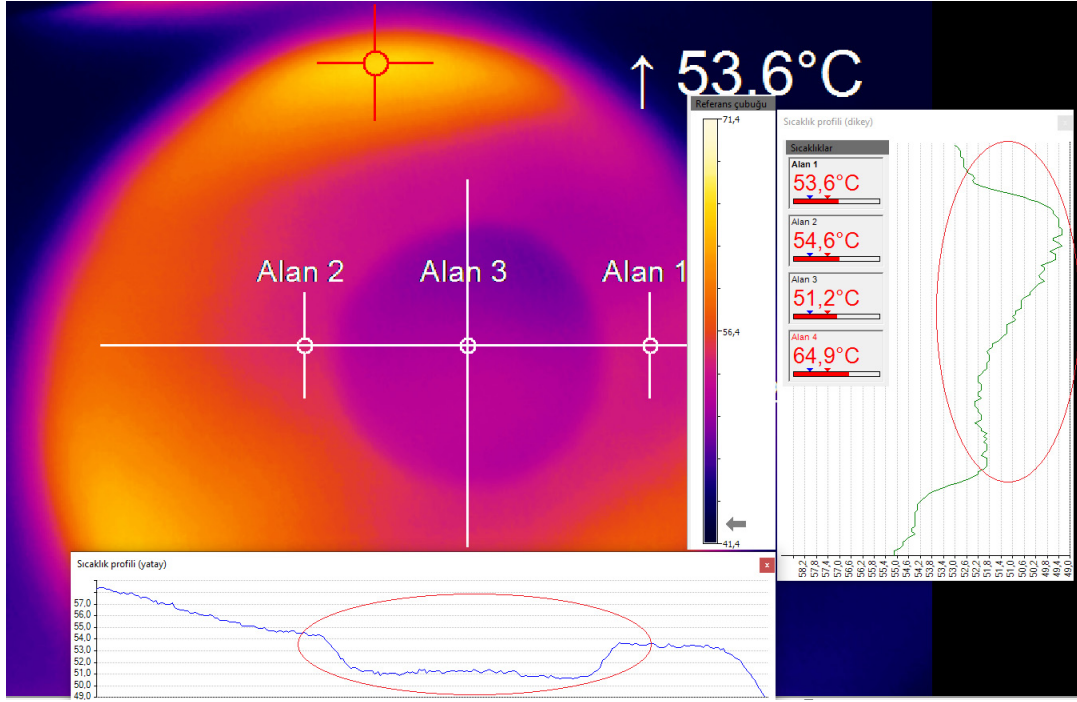
Şekil 4.44. Üçüncü Test Parçasının Termografik 1. Kontrolü



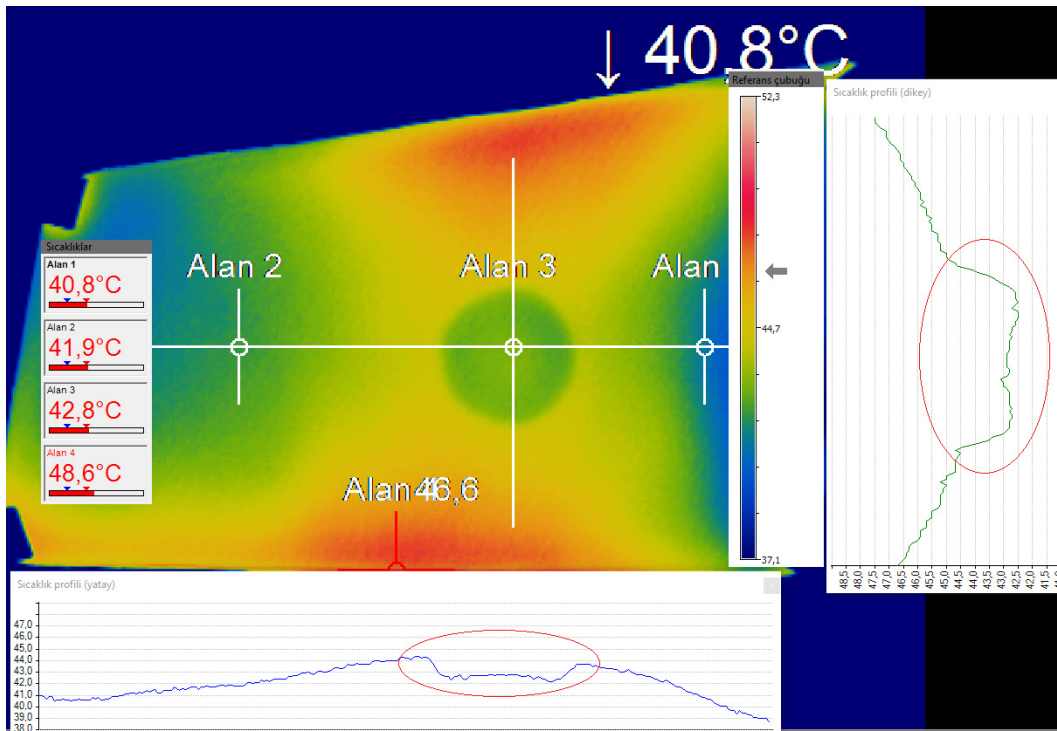
Şekil 4.45. Üçüncü Test Parçasının Termografik 2. Kontrolü

4) Dördüncü test parçası için kontrol (Katlar arası yapışmama, boşluk)

Vakumsuz olarak ve ara katmanda boşluk bırakılarak üretilen dördüncü test parçasının ilk kontrolü Şekil 4.46 ve ısı plakası kullanılarak ikinci kontrolü Şekil 4.47 gösterilmiştir.



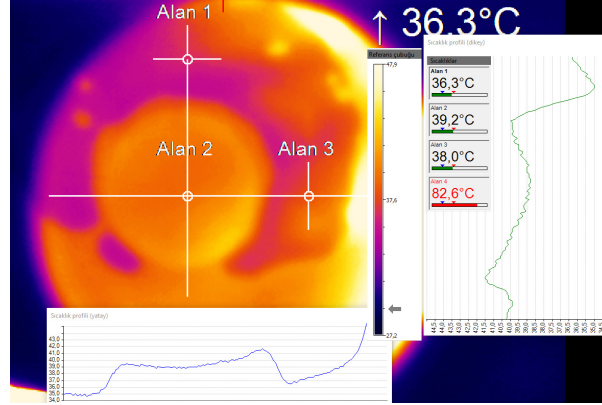
Şekil 4.46. Dördüncü Test Parçası Termografik 1. Kontrolü



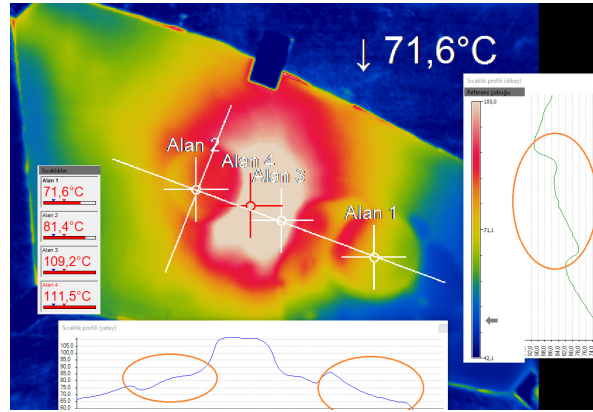
Şekil 4.47. Dördüncü Test Parçası Termografik 2. Kontrolü

5) Beşinci test parçası için kontrol (vakumlu boşluklu ve ekstra katmanlı)

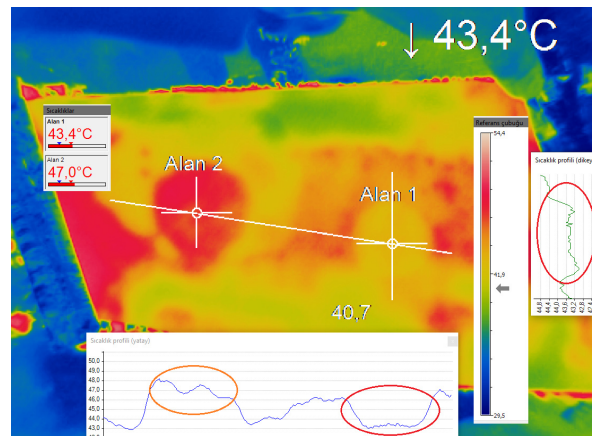
İki parça halinde ilk üretimi gerçekleştirilen daha sonra ikinci bir yapışma ile iki parçanın birbirlerine yapışması farklı katlar ve ikinci yapıştırıcı kullanılarak yapılan beşinci test parçasının ilk kontörlü Şekil 4.48, ısı plakası kullanılarak ikinci kontrolü Şekil 4.49 ve termal macun uygulaması yapılarak gerçekleştirilen üçüncü kontrolde Şekil 4.50'de gösterilmiştir



Şekil 4.48. Beşinci Test Parçası Termografik 1. Kontrolü



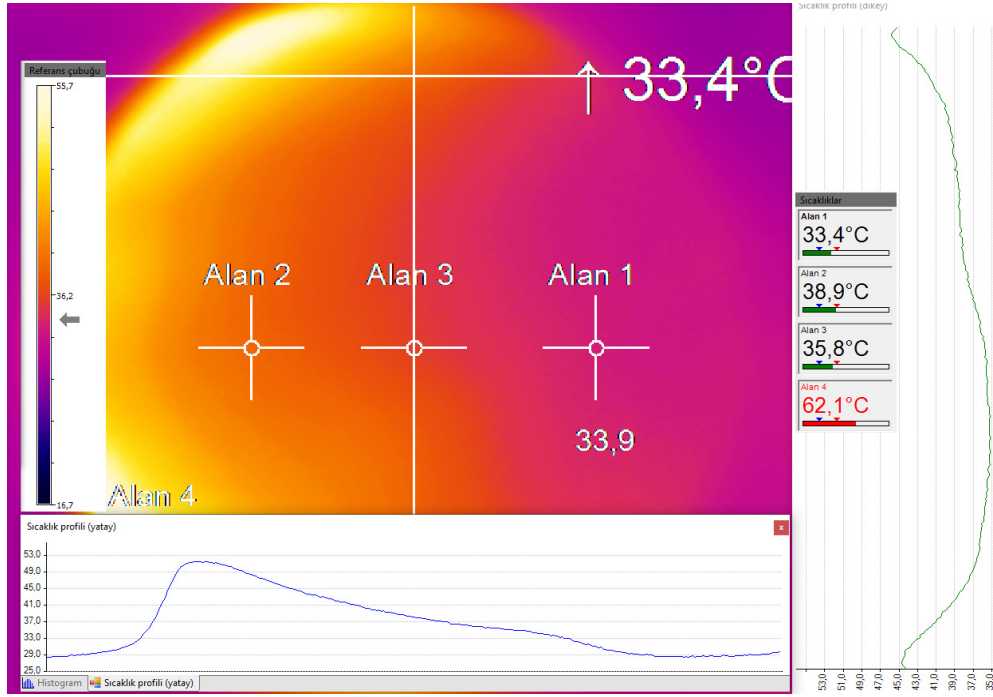
Şekil 4.49. Beşinci Test Parçası Termografik 2. Kontrolü



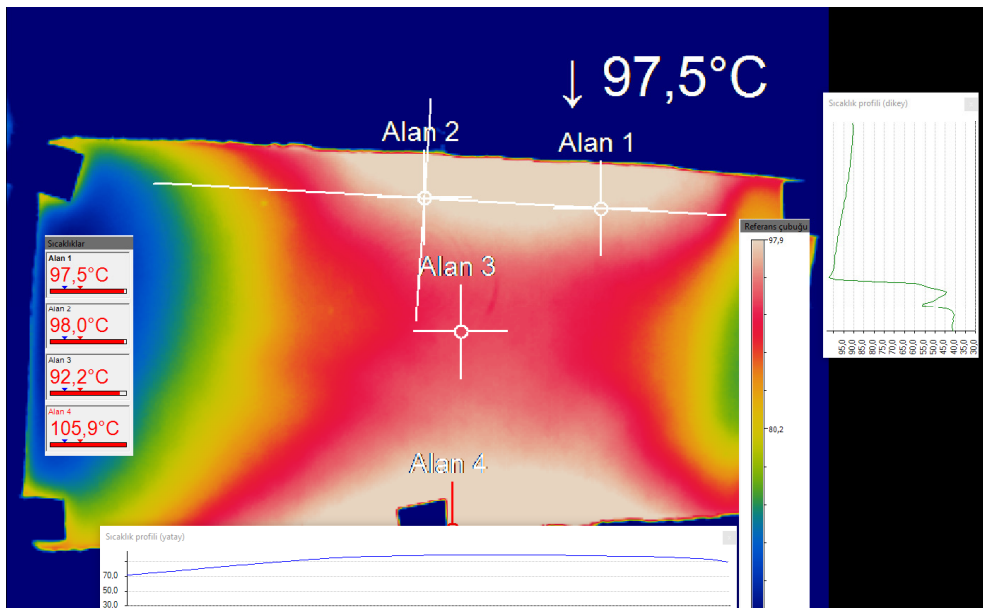
Şekil 4.50. Beşinci Test Parçası Termografik 3. Kontrolü

6) Test parçası için kontrol (Kesik Fiber ve Yabancı madde kalıp ayırıcı)

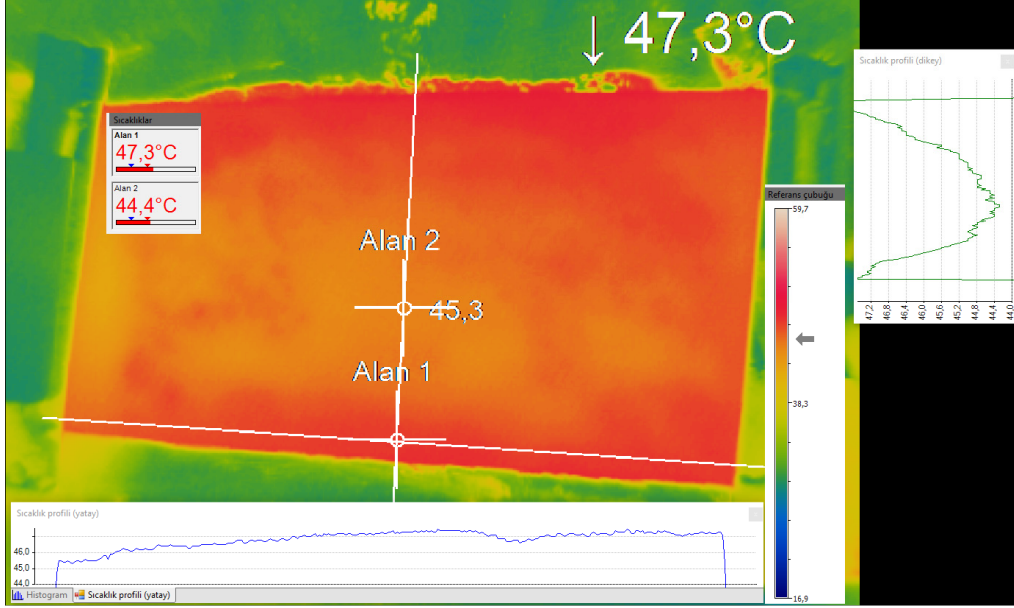
Ara katmanda kesik fiber ve katmanlı yapının kenarından kalıp ayırıcı sürülerek üretilen altıncı test parçasının ilk kontrollü Şekil 4.51’de, ısı plakası kullanılarak ikinci kontrolü Şekil 4.52’de, termal macun uygulaması yapılmış kontrol Şekil 4.53’de ve en son ultrasonik yöntem ile yapılan kontrol Şekil 4.54’te gösterilmiştir.



Şekil 4.51. Altıncı Test Parçası Termografik 1. Kontrolü



Şekil 4.52. Altıncı Test Parçası Termografik 2. Kontrolü



Şekil 4.53. Altıncı Test Parçası Termografik 3. Kontrolü



Şekil 4.54. Altıncı Test Parçası Ultrasonik Kontrolü

4. 5. Verilerin Çözümlemesi

4.5.1 Birinci test parçasının termografik incelenmesi

Hatasız olduğu kabul edilen test parçası termografik kontrol öncesinde Şekil 4.404.40'da gösterildiği gibi ultrasonik tahribatsız muayene yöntemi ile malzeme kontrol edilmiştir. Malzeme tamamında çift ultrasonik prob/ölçüm ucu kullanılarak katmanlar arası süreksizlik takibi yapılmış ve hata tespit edilmemiştir.

Şekil 4.38'e göre Termografik 1. Kontrole göre merkezi yuvarlak ısıtıcı ile sıcaklık dağılımının homojen bir şekilde olduğu tespit edilmiştir. Malzeme üzerinde, yuvarlak ısı kaynakından kaynaklanan ısı enerjinin malzeme üzerindeki sıcaklık değişimleri incelenmiş, süreksizlik tespit edilmemiştir Şekil 4.39'da termografik 2. Kontrol yapılmıştır. Test parçası köşelerinden sabitleme bantları kullanılarak malzemeni ısı plakası tüm yüzeyiyle kontak yapması ve ısının homojen dağılımı sağlanmıştır. 2. TRK'de de süreksizlik tespit edilmiştir.

4.5.2 İkinci test parçasının termografik incelenmesi

İkinci test parçasında önceden reçine emdirilmiş bez koruyucu katmanı olarak bulunan veya vakum çantası üretim yönteminde kalmış vakum naylonu malzemeye yapışmış/katman arasında kalmış olabileceği yabancı maddelerin tespit edilmesi amaçlanmış olup, yapılan Şekil 4.41'e gösterilen 1. TRK'de tespit edilememiştir. Bu kontrolde malzeme üzerine uygulanan ısı enerjisinin homojen olmayan bir biçimde ve bölgesel olarak kaldığından dolayı yüzey plakası ısıtılıp, Şekil 4.42'de 2. TRK'de test parçasının sol taraf yarısı incelendiğinde test parçası ortasında yuvarlak şekilli yabancı bir maddenin, kompozit katmanlı yapıdaki ısı geçişini bozduğu, süreksizliğe neden olduğu tespit edilmiştir. Malzeme üzerindeki yatay ve dikey sıcaklık profillerinde lineer bir ısı geçiş radyanı beklenirken, sıcaklıkların düşmüş olduğu ve bir süreksizlikten olduğu saptanmıştır. Ayrıca termal kamera görüntüsünde oluşan renkli sıcaklık dağılımında da yuvarlak şekli olarak kusur belirlenmiştir. Parçanın sol tarafında da homojen ısı dağılımı tespit edilmemiş ve yabancı madde bitimine bir hat oluşmuştur. Isı kaynağı malzemenin ortasında olduğundan ve sağ tarafındaki tespit edilen

süreksizlik malzemenin kenarına kadar gittiğinden parçanın sol tarafındaki tespit edilen süreksizlik gibi daha keskin hatlar tespit edilememiştir.

İkinci test parçasının Şekil 4.43’de gösterilen kontak yüzeyine termal macun uygulaması ile TRK yapılmış ama ısı geçiş süresi ve iletimi çok hızlı olduğundan süreksizlik tespit edilememiştir.

4.5.3 Üçüncü test parçasının termografik incelenmesi

Üçüncü test parçasında farklı 2 malzemenin TR olarak tespit edilmesi amaçlanmıştır. Cam elyaf malzemesi için de 2 farklı bölgede metal malzeme gömülmüş olarak imal edilen test malzemesinin Şekil 4.44’de gösterilen birinci TRK’de metal ve cam fiber malzemelerin ısı iletkenliklerin çok farklı ve malzemeler arası kalınlık farkının olmasından dolayı termal görüntü farklılığı ve sınır tabakası hassas bir şekilde tespit edilmiştir. Test malzemenin sıcak yüzey plakası kullanılarak yapılan TRK’ü Şekil 4.45’te gösterilmiştir. Sıcak yüzey plakası üzerinde yapılan kontrolde de farklı metal malzemelerin TR muayenesi net ve hassas olarak tespit edilmiştir. 1’inci ve 2’nci TRK neticesinde alınan sonuçlardan dolayı termal macun uygulaması yapılarak kontrol yapmaya gerek duyulmamıştır.

4.5.4 Dördüncü test parçasının termografik incelenmesi

Katmanlı kompozit parça imalinde kullanılan vakum çantası yönteminde vakum altında katmanların birbirine yapışması sağlanmaktadır. Ancak kür döngüsü sırasında kür sıcaklığına oluşmadan vakum çantasında oluşmuş bir kusurdan dolayı vakum yapılamadığında katmanlar arasında boşluk oluşabilmektedir. Bu kusur durumu test etmek amacıyla vakumsuz olarak üretilen katmanlı dördüncü test parçasının 1’inci TRK’ü Şekil 4.46’da gösterilmiştir. Kontrol bölgesi ısıtıcı boyutunda hata bölgesi yatay ve dikey sıcaklık profillerinde de 3 derecelik farklılık ile arada kalan hava bölgesinde sıcaklığın düştüğü ve bölgede kusur olduğu tespit edilmiştir.

Dördüncü test parçasının TR 2. Kontrolü Şekil 4-47’de gösterilmiştir. 2’nci kontrol’de 1’inci kontrole kıyasla daha düşük sıcaklıklarda muayene yapılmıştır, yatay ve dikey sıcaklıklarda fark 2°C ölçülmüştür. TR 1. ve 2. Kontrolle süreksizlikler net bir şekilde tespit edildiğinden termal macun uygulaması ile kontrol tekrarlanmamıştır.

4.5.5 Beşinci test parçasının termografik incelenmesi

Beşinci test parçasının TR kontrolünde farklı katman kalıklarındaki kompozit malzemelerin tespit edilmesi ve termal görüntü kıyaslama yapılması amaçlanmıştır. Şekil 4.48’de gösterildiği gibi 1’inci kontrolde yuvarlak ısı plakasında malzemenin kalın yuvarlak kat olan kısmında kontrol gerçekleşmiş olup, kalınlık fazla olan kısımda çevre alanlara göre daha yüksek sıcaklığa oluşmuş olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca termal görüntüde yuvarlak ekstra katman çevresinde düzensiz renklenme/sıcaklık farkları tespit edilmiştir. Bu renklemenin ekstra katman çevresinde vakum ile yapışmaya göre daha az yapışmış olduğu ve araya fazla reçinenin dolmuş olabileceği değerlendirilmiştir.

Isıtılmış yüzey plakası kullanılarak gerçekleştirilen 2’nci TRK’de test parçasının tamamı incelenmiştir. Katman farklarının olduğu yatay ve dikey eksenlerde sıcaklık farkları Şekil 4.49’da gösterilmiştir. Test parçası üzerinde az katmanlı ve arada boşluk kalmış yerdeki sıcaklık yaklaşık 5 derece daha düşük olduğu ve geometrik olarak şeklin termal görüntüde görüntülenebilmiştir. 2. TRK’de 1’inci TRK’de olduğu gibi katman fazlalığı olan bölgede geometrik olarak termal görüntüde fark tespit edilmiş ayrıca sıcaklık profillerinde çevre alanlara göre daha yüksek sıcaklık olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca katman kalın bölge etrafındaki yapışma problemi oluşan alanlarda 2’nci TRK’de tekrar tespit edilmiştir.

Termal macun uygulaması yapılmış ısıtma konfigürasyonunda Şekil 4.50’de gösterilen beşinci test parçasının TRK’de fazla ve az katmanlı bölgeler tespit edilmiş olup, 2’nci kontrolde olduğu gibi katman fazla bölgede daha yüksek sıcaklık, az katmanlı bölgede daha düşük sıcaklıklar yatay ve dikey sıcaklık profillerinde olduğu gözlenmiştir.

4.5.6 Altıncı test parçasının termografik incelenmesi

Altıncı test parçasında katmanlı yapıya kalıp ayıcı malzemesinin sızmış olma durumu ve fiber dokuma malzemedeki fiberlerin kesilmiş olduğu durumuna göre üretilmiş malzemenin termografik olarak tespit edilebilmesi amaçlanmıştır. Yuvarlak ısı plakası kullanılarak 1’inci TRK Şekil 4.51’de, ısı yüzey plakası kullanılarak 2’inci TRK Şekil 4.52’de ve termal macun kullanılarak yapılan 3’üncü TRK Şekil 4.53’de gösterildiği gibi yapılmış ancak, termoradyografi yöntemi ile her üç yöntemde de süreksizlik/hata tespit edilememiştir. Ayrıca

malzemedeki kalıp ayırıcıdan kaynaklanan katmanlar arası ayrılma olup olmadığı ya da yapışmama kusuru tespit edebilmek Şekil 4-54’de gösterildiği gibi iki tespit ucu kullanılarak ultrasonik kontrol yapılmıştır. Ultrasonik kontrolde de malzeme üzerindeki yapışma kusuru ve kesik fiber hataları tespit edilmemiştir. Kalıp ayırıcı malzemenin fenolik reçine içerisine tam olarak ayrılma kusuruna neden olmadığı ve fiber malzeme kesik olması reçine matris malzemesi üzerinde yapısal bütünlüğünü koruduğu için hata olarak tespit edilmediği değerlendirilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Uçak kompozit yapılarında termografik/termoradyografik kontrolün incelemesi amacıyla yapılan bu çalışmada termografik kontrol temel prensipleri araştırılmış, termal kamera özellikleri ve kullanılacak teçhizatlar araştırılmıştır. Uçak yapılarında kullanılan katmanlı dokuma ve önceden reçine emdirilmiş malzemelerden kupon test malzemelerinin üretilmesi, üretim yöntemlerin açıklanması ve açıklanan yöntemlere göre test malzemelerin üretilmesi gerçekleştirilmiştir. Üretilen katmanlı kompozit malzemelerde kontrol edilebilecek ve sıklıkla karşılaşılan hatalar ile üretilmiştir. Üretilen test malzemeleri termografik olarak hazırlanan test düzeneğinde ve 3 farklı ısıtma koşulunda kontrolleri gerçekleştirilmiştir.

5.1. Veri Toplama Araçlarındaki Bulgular

5.1.1 Termal kamera

Termografik tahribatsız uçak kompozit yapıları kontrolündeki temel araç olarak kullanılan Optris PI400 model termal kamera yapılmak istenen kontrol için yeterli bulunmuştur. -20°C 'den 1500°C 'ye sıcaklık aralığında $\pm 2^{\circ}\text{C}$ sistem hassasiyetinde olması yüksek sıcaklıklardaki kontrol yapılabilmesi avantaj sağlamaktadır. Değiştirilebilir lens konfigürasyon ile kontrol parçası ile çalışma yapılabilmesi uzak ve yakın kontroller açısından önemlidir. Yapılan testlerde tek odak uzaklıklı lens kullanılmış olup, netleme ve odaklamak için kamera yakınlığı ayarlanmıştır. Geniş alanlarda tek seferde kontrol yapılabilmesi için tele, geniş açı ve sabit odak uzaklıklı lensler ile farklı boyutlu ve test düzenli çalışmalar yapılabilir.

5.1.2 Isıtıcılar

Termal görüntü için gerekli ısı akışı sağlanabilmesi için bu çalışmada 18.5 cm çapında yuvarlak ısı plakası kullanılmıştır. Isıtıcı boyutundan dolayı lokal olarak ölçümler yapılabilmektedir. Geniş yüzeylerde ölçüm yapabilmek için yüzey plakası kullanılmıştır. Geniş alanların tek seferde kontrolün yapılabilmesi için farklı ısıtıcı yöntemleri kullanılabilir. Ayrıca kontrol yapılırken ısıtıcı test malzemesi arkasından etki ettirilmiştir ve malzeme kalınlığı boyunca kontroller gerçekleştirilmiştir. Çok kalın malzemelerde kalınlık boyunca ısı

iletim süresince malzeme ısı olarak dengeye geldiğinden çift taraflı kontrol ya da bir yüzeyinden ısı kaynağı, diğer yüzeyinden termal görüntü almak mümkün değildir. Ayrıca ısı kaynağından gelen ısı için temas ile/iletim ile ısı transferinde arada boşluk olması veya malzeme yapısından kaynaklanan burulmalardan dolayı istenen homojen ısı dağılımı elde edebilmek için sabitleme bandı ve ısı iletken macun uygulamaları gereksinim duyulmuştur. Isıl iletken macun uygulamasında macunun homojen dağılımı sağlanamadığından kontrollerde olumlu ve olumsuz etkileri belirlenmiştir.

5.1.3 Bilgisayar

Termal görüntülerin alınması ve analiz edilmesi için kullanılan bilgisayar taşınabilir olmasından dolayı sahada kullanılabilir. 2010 üretim modeli ile yeni konfigürasyonda olmayan bir bilgisayar ile işlemleri yapabilmektedir. Ancak termal görüntü kaydının yanında sıcaklık profillerinin de kaydedilmesi veri tabanı dosyalarının boyutunu büyük olmasına neden olmaktadır. Yapılan çalışmalarda 60 sn TRK'nın 0.33 GB veri boyutu kapladığı hesaplanmıştır. TRK'nın kolay tekrar edilebilir olması ve geri dönük olarak tekrardan incelemenin yapılabilmesiyle kayıtlı dataların saklanabilecek yüksek kapasiteli hafıza birimlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

5.2. Termografik Kontroldeki Bulgular

Bu çalışmada önceden reçine emdirilmiş cam elyafı dokumadan katmanlı olarak imal edilen uçak malzemeleri benzetimi yapılmıştır. Yapılan kontrollerin uçak yapılarında kullanıldığı için kontrollerin de uçak gerçek yapılarında kullanılabilirliği saptanmıştır. Katmanlı olarak imal edilen test malzemelerin 6 katta kontrol yönteminin kullanılabilirliği tespit edilmiş olup, kalın malzemelerde kalınlık yönünde ve aksenel yönlerde aynı anda ısı dengeye ulaşılacak kalınlıklarda kontrolün yapılamayacağı değerlendirilmiştir. Farklı malzemeler ve test senaryolarına göre kontrol edilebilecek malzeme katman sayıları farklılık gösterecektir.

Test parçaları hazırlanırken göz önünde bulundurulmuş uçak yapılarında kullanılan metal olmayan katmanlı kompozit malzemelerinde sık karşılaşılan hata/hasar durumlarına göre imal edilmiştir. Bu hata durumlarından katmanlı yapı içinde/üzerinde olduğu durumda ısı iletkenlik değiştiği için TRK 'de tespit edilebildiği görülmüştür. Yabancı madde

katmanlar arasında yapışma özelliğini etkilediği Polivinilalkol film ve metal malzeme gibi durumda tespit edilmiştir, ancak kalıp ayırıcı gibi sıvı formda ve yapıştırma etkinliğini TRK ile tespit edilecek kadar azaltmadığı belirlenmiştir.

Katmanlı kompozit yapılarıdaki katman kalınlıkları farkları ve katmanlar arasında kalan boşluklar kusur olarak değerlendirilebilmektedir. TRK’de üretilen test parçalarında az katman, fazla katman ve katmanlar arası bırakılan boşluklar tespit edilebilmiştir. Az ve çok katmanlı malzemeler vakum çantası yönteminden dolayı vakumla katman aralıkları ve boşluklar giderilmiş olsa dahi sınır tabakalarında yapışma kusurları bu çalışmada belirlenmiştir.

5.3. Tartışma

Malzeme teknolojinin gelişmesi ile havacılıkta kullanılan malzemelerinde de çeşitlilik artmaktadır. Wright kardeşlerden günümüze uçak yapılarında kullanılan malzemeler her geçen gün artmış ve karmaşık bir yapıya gelmiştir. Bu karmaşık durumda mühendislik nosyonuna uygun olarak problemlerin tanımlanması ve çözüme ulaştırması amaçlanmıştır. Havacılıkta kullanılan malzemelerin ve özellikle uçak yapısal bileşenlerin hava durumu, motor titreşimleri ve ısı etkisi, aerodinamik ve mekanik kuvvetlerin etkisinin incelenmesi, bu malzemelerin hata/kusurlarının açıklanması ve çözümlenmesi gerekmektedir. Bu hata/kusurlardan uçak yapılarında kullanılan kompozit malzemelerin üretim ve servis ömürleri boyunca kontrol edilmesi ve servise devam etmesi, onarılması veya servisten çekilmesi durumları ortaya çıkmaktadır.

Bu deneysel çalışmada ısı plakası kullanılarak kızılötesi termoradyografi tahribatsız muayene yöntemi kullanılarak havacılıkta kullanılan metal olmayan katmanlı kompozit kupon test malzemeleri çalışılmıştır. Katmanlı Kompozit malzemelerde genel hata tipleri kupon testlerde belirlenmiş ve incelenmiştir.

Literatür çalışmalarında kompozit yapıların üretim ve servis koşullarında tahribatsız muayene olarak termografik kontrolün kullanıldığı ve kullanılabilirliği tartışılmış ve örnekler verilmiştir.

Poudel vd'nin 2016 yılında yapmış olduğu çalışmada uçak yapılarında kompozit malzemelerin kullanım oranının artması ile bu malzemelerin servis ömürleri boyunca hasarlanabildiği ve değiştirilmesinden göre onarılmasının daha ekonomik bir çözüm olduğu ve onarımların kontrol edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Sharlonun 2018 yılındaki çalışmasında kompozit malzemelerin gelişmesi ile termografik kontrol yönteminin bu malzemelerde kullanım alanının genişlediği ve farklı ürünlerde kullanıldığını belirtmiştir.

Kompozit malzemelerin uçak yapılarında kullanım oranının artması ve bu hızlı üretimin otomatik sistemlerde üretilmesi, personel hatası ve insan gücünün azaltılması ile beraber temassız olarak TK öneminin arttığı 2010 yılında Ullmann vd.nin çalışmasında gösterilmiştir. Karbon ve bor epoksi havacılık malzemelerinin çeşitli hatalarının deneysel olarak çalışmaları Avdelidis vd., 2003 yılında yapmıştır ve termografik kontrol yönteminin mükemmel sonuç verdiği tespit edilmiştir. Ancak Peeters vd'nin 2019 yaptığı çalışmada seri kompozit malzeme üretiminde tezgah mekanik titreşimlerden dolayı termografik kontrolde buğu ve çözünürlüğün bozulduğu tespit edilmiştir ve pultrüzyon gibi seri kompozit malzeme üretiminde karşışın termografik kontrol sınırlılıklarını ortaya koymuştur.

Rajic'nın 2010 yılında yapmış olduğu çalışmada Avusturya Savunma Bilim ve Teknoloji örgütü olarak Austurya savunma gücünde termografik kontrolün uygulanabilir olduğunun araştırması yapılmıştır. TRK uçaklarda uygulanabilir olarak değerlendirilmesinin yanında, uçakların teknik kitaplarında var olmaması, nispeten yüksek denetim hızınsa sahip olmakla birlikte diğer NDI yöntemine göre daha sezgisel olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca 2012 yılında Mieloszyk vd.nin AW-139 helikopterlerinin CFRP panellerinde yapılan termografik deneysel çalışmasında ayrılma hasarları incelenmiş ve analiz edilmiştir.

Tüm literatür çalışmalarında sivil ve askeri havacılıkta kullanılan kompozit malzemelerin üretim ve servis koşullarında termografik analizin kullanılabilirliği ve deneysel çalışmalarından yola çıkarak, türk hava kuvvetlerinde var olmayan termografik kontrol yönteminin envanterde bulunan uçaklarda kullanılabilirliğinin araştırması amacıyla, yöntemin araştırılması, envanterdeki uçak yapılarında kullanılan kompozit katmanlı bir malzemedan imal edilmiş ve çeşitli hasar tiplerinin benzetimi yapılmıştır. Literatür çalışmalarından farklı olarak mevcut termal kamera ve ısıtma sistemleriyle bu kontrolün

yapılabileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca özellikle daha önce çalışılmamış bir malzemede ve karşılaşılan hasar tiplerinde benzetim yapılmıştır. Üretim yöntemi detaylandırılmıştır.

Termografinin avantajları

- * Hızlı, kolay ve temassız bir kontrol yöntemidir.
- * Taşınabilir bir yöntemdir ve İSG açısından risk teşkil etmez.
- * Kontrol süresi yüksek iletkenlik malzemeleri için birkaç saniyeden düşük iletkenlik malzemeleri için birkaç dakikaya kadar değişir.
- * Çok geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir.
- * Termografi, tespit edilmesi zor olan malzemedeki boşluklara duyarlıdır.
- * Dijital termografik kayıt ekipmanları ile analizler tekrar edilebilir ve kayıt ve arşivlenmesi kolaydır.
- * Büyük bir alanın sıcaklığını karşılaştırmak için görünür bir resim elde edilir.
- * Hareket eden hedefleri eşzamanlı görüntülenebilir.
- * Termal kameralar bize görünür bir resim verir bu da bize büyük bir alanın sıcaklığını karşılaştırabilme imkanı sağlar.
- * Boşluklar, inklüzyonlar, kalıntı, yabancı madde, yapışmama, sıvı girişi veya kirlenme, yabancı maddeler, hasarlı veya kırılmış yapısal montajlar hasarlı TRK yöntemi ile tespit edilebilir.

Termografinin dezavantajları

- * Ucuz ve pahalı test ekipmanları vardır. Kaliteli kameralar pahalıdır ve kolayca hasar görürler.
- * Emisyon, mesafe, ortam sıcaklığı ve bağıl nem ölçülen sıcaklık değerlerinin yanlış olmasına neden olabilir.
- * Çoğu termal kamera, sıcaklık ölçümünde $\pm\%2$ doğruluk veya daha kötüdür ve temaslı yöntemleri kadar doğruluk değerlerine sahip değildir. Termal kameralar yalnızca yüzey sıcaklıklarını ölçer.
- * Elde edilen resimleri doğru şekilde yorumlamak tecrübeli kişiler için bile zor olabilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, TRK'ün uçak kompozit yapılarında kullanılabilirliği araştırılmış, örnek test malzemeleri üretilmiş ve termografik muayene yöntemi kullanılarak kontrol edilmiştir. Bu bölümde yapılan çalışmada elde edilen bulgulardan çıkarılan sonuç ve önerilerden bahsedilmiştir.

6.1. Sonuç

Katmanlı kompozit malzemelerden bu çalışma için imal edilen 6 farklı test parçaları TR muayene yöntemi ile kontrol edilmiştir. Kontrol sonucunda tespit edilen ısı yayılımında karşılaşılan aksaklıklar 3 farklı test ortamı ile aynı test parçaları üzerinde tekrar edilmiştir. Malzeme üzerinde oluşacak ısı yayılımını tespit etmek amacıyla kullanılan harici ısı kaynaklarının çeşitli olmakta, seçilen ısı kaynağının malzeme üzerindeki ısı akışına etki eden faktörler tespit edilmiştir. Bu çalışmada ısı kaynağı olarak seçilen ısı plakasında malzeme boyutu, malzeme yüzey düzgünlüğü ve malzeme ile ısı kaynağı arasında kuplaj malzemesi kontrol sonuçlarını etkilemiştir.

Bu çalışmada kullanılan termal kamera ve bilgisayar sistemi yapılan çalışma çerçevesinde uyumlu olarak ve amaca uygun bir şekilde kontrol için ölçüm yapılabilmiş ve kontrol verileri incelenmiştir. Termal kamera ve bilgisayar sistemi kontrol ve veri analizi için yeterli bulunmuştur.

Kompozit malzemelerin yapısından kaynaklanan üretim esnasında ve üretim sonrasında hasar oluşmasına uygun yapıdadır. Bu tez çalışmasında katmanlı kompozit yapılarda-tipik olarak karşılaşılan hasarların benzetimi yapılmıştır. 6 farklı test parçalarından, hasarsız malzeme, yabancı madde (PVA ve metal), katlar arası boşluk/ayrılma, fazla/az katman ve yapışmama kusurları termografik kontrol ile tespit edilmiş olup, kesik fiber ve sıvı yapıştırıcı hataları için imal edilen parçada termografik kontrol ile tespit edilememiştir. Bu parçada üretim esnasında oluşturulan hatalar katmanlı malzeme yapışma hatasına sebep olmadığı yapılan ultrasonik kontrolde de belirlenmiştir.

Sonuç olarak termografik olarak uçak yapılarında kullanılan metal olmayan önceden reçine emdirilmiş dokuma katmanlı/sandviç malzemelerinden hata tespiti yapılmıştır.

6.2. Öneriler

Katmanlı kompozit test parçası ham malzeme olarak önceden fenolik reçine emdirilmiş 7781 stil E-cam elyafından üretilmiş dokuma kullanılmıştır. Bu malzeme genel olarak uçak iç yapılarında ve elektriksel iletim ihtiyacı olan anten yapılarında kullanılmaktadır. Termografik kontrol yönteminin tüm uçak yapılarında kullanılabilmesi için her bir farklı malzemedan benzetim/referans standart malzemelerinin imal edilmesi ve bu malzemelerin sertifikasyonu gereklidir.

Bu çalışmada ısı kaynağından kaynaklanan ısıtma ve ısı kontrol alanı sınırlamaları ile karşılaşmıştır. Aynı zamanda ince ve malzemenin her iki yüzeyine ulaşılabilen durumlarda bu ısı kaynağı kullanılabilir. Uçak üzeri ve malzemenin arkasına ulaşamayan durumlarda ısı kaynağı yerleştirilemeyeceği için kullanılamamaktadır. Farklı ısı kaynakları ile malzeme arkasına ulaşamayan durumlar benzetim yapıp analizleri gerçekleştirilebilir.

Malzeme boyutuna ve test düzeneğine göre kullanılan kamera sistemi yeterli olmuştur ancak daha büyük ve yüksek sıcaklık olan sistemlerde uzaktan ve geniş açı ile termal görüntü alınması ihtiyacı bulunmaktadır.

Test malzemeleri üretimi için kullanılan malzemelerde belirlenmiş olan hata tiplerinde dahili hasarlar incelenmiş olup, harici olarak gözle görülen bilen hasar veya malzeme arkasında oluşan yüzeydeki hasarların, katmanlı yapıların katman sonunun tespiti gibi farklı hata/kusur ve malzeme tespitinde çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- AIRBUS Defence & Space. (2018, Aralık 31). Thermography - Description.
- Aktaş, Y. D. (2019). 3. *KOMPOZİT MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ*.
<http://debis.deu.edu.tr/userweb//mehmet.aktas/Kompozit%20Malzemeler/Ders%20%203/3.pdf> adresinden alındı
- Anish Poudel, K. R. (2016). Non-destructive evaluation of composite repairs by using infrared thermography. *Journal of Composite Materials*, 351-363.
- Ataş, P. C. (2019). *Dersler*. 1.Kompozit Malzemelere Giriş:
http://kisi.deu.edu.tr//cesim.atas/kompozit/4_%20Uretim%20Yontemleri.pdf adresinden alındı
- Automation Technology GmbH. (2019, 12 19). *Active Thermography for Nondestructive Composites Testing*. Quality Magazine:
<https://www.qualitymag.com/articles/91207-active-thermography-for-nondestructive-composites-testing> adresinden alındı
- Bashny.net. (2019, Aralık 20). *Some methods of manufacturing products from composites*.
<https://bashny.net/t/en/295145> adresinden alındı
- Baylan, O. (2019). *Tahribatsız Muayene Yöntemleri Karşılaştırılması*. Metal ve Kaynak Teknolojileri: <https://www.metaluzmani.com/tahribatsiz-muayene-yontemlerinin-karsilastirilmasi-tablo-halinde/> adresinden alındı
- Carosena Meola, S. B. (2017). *Infrared Thermography in the evaluation of Aerospace Composite Materials*. Kidlington: Woodhead Publishing in Materials.
- Chen, D., Zhou, J., Sun, Z., & Wang, X. (2019). Pulsed thermography for the NDT of honeycomb composite. *Proc. SPIE 11023 Fifth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Application*. Xi'an.
- COMPOSITES UNIVERSAL GROUP . (2017-2019). *Processes*. Manufacturing & Assembly: <http://compositesuniversal.com/manufacturing-6.html> adresinden alındı

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Çalık, F. (2017, Kasım 11). GÖRSEL KONTROL (VISUAL INSPECTION-VT). Eskişehir.
- D. Wu, A. S. (1997). Inspection of aircraft structural components using lockin-thermography . *QIRT 96 - Eurotherm Series 50 - Edizioni ETS, PISA*, s. 251-256.
- David Cripps, G. (2019, Ocak 24th). *Wet/Hand Lay-up*. NetComposites: <https://netcomposites.com/guide/manufacturing/wet-hand-lay-up/> adresinden alındı
- FLIR System Inc. (2017, Ocak 24). FLIR X8500SC. Brezilya.
- Hexcel Corp. (2016). HexPly® HT93 135°C curing phenolic matrix. Amerika.
- HEXCEL Corp. (2017). HexForce® Reinforcements Technical Fabrics Handbook. Texas, Seguin, Amerika.
- International Electrical Testing Association. (2019, Kasım 26). IR Scanning Handbook.
- Jeroen Peeters, S. V. (2019). Optimized dynamic line scanning thermography for aircraft structures. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 260-275.
- Keiner, L. E. (2019, Ocak 12). Surface Interactions.
- M. Mieloszyk, M. K. (2012). Active Thermography Method for Delamination Detection and Localisation in Composite Structures. *6th European Workshop on Structural Health Monitoring - Fr.2.B.4*. Dresden: German Society for Non-Destructive Testing.
- Maldague, X. P. (2001). *Theory and practice of infrared technology for*. New York: Wiley Series in Microwave and Optical Engineering.
- Mazumdar, S. K. (2002). *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*. CRC Press.
- N. Rajic, D. R. (2010). An Australian Perspective on the Application of Infrared Thermography to the Inspection of Military Aircraft. *2nd International Symposium on NDT in Aerospace 2010 - Tu.1.B.1*. Hamburg.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- N.P. Avdelidis, B. H. (2003). Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites. *NDT & E International*, 433-439.
- NDT Resource Center. (2019). *Introduction to Radiographic Testing*. (I. S. University, Editör) Kasım 28, 2019 tarihinde NDT Resource Center: https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/cc_rad_index.htm adresinden alındı
- Omega Engineering, Inc. (2018, Ağustos 29). *Infrared Thermometer*. Omega a Spectris Company: <https://www.omega.com/en-us/resources/infrared-thermometer> adresinden alındı
- Optris GmbH. (2019). Termal Kameralar. Berlin, Almanya.
- P. Theodorakeas, N. A.-C. (2011, Mayıs). Automated transient thermography for the inspection of CFRP structures: experimental results and developed procedures. *The International Society for Optical Engineering*.
- POLSER Şeffaf Çatı Örtüleri San. ve Tic. A.Ş. (2019). *Fiberglass Types*. POLSER A.Ş.: <https://polser.com/en/frp/fiberglass-types> adresinden alındı
- Sharlon, M. R. (2008, 01 01). *Active Thermography: An Overview of Methods and Their Applications in Use Today*. Conway, Arkansas, Amerika.
- T. Ullmann, R. A. (2010). Lock-in Thermography for Process Integrated Non-Destructive Evaluation of Carbon. *10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*. Québec Canada.