

Mevlüt ARSLAN

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

Doktora Tezi

**Bir Yüzeyinden Isıtılan Düzlemsel Malzemenin
Kızılötesi Termografi ve Görüntü İşleme Teknikleri ile
Tahribatsız Muayenesi için Yeni Bir Sistem**

Mevlüt ARSLAN

KÜ 2011

KASIM 2011

Makina Anabilim Dalında Mevlüt ARSLAN tarafından hazırlanan BİR YÜZEYİ ISITILAN DÜZLEMSEL MALZEMENİN KIZILÖTESİ TERMOGRAFI VE GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ İLE TAHRİBATSIZ MUAYENESİ İÇİN YENİ BİR SİSTEM adlı Doktora Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof.Dr. Veli ÇELİK
Anabilim Dalı Başkanı

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

Prof. Dr. Ali ERİŞEN
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof.Dr.Şeref SAĞIROĞLU _____
Üye (Danışman) : Prof.Dr.Ali ERİŞEN _____
Üye : Prof.Dr.Yahya DOĞU _____
Üye : Doç.Dr.Cemil Berin EROL _____
Üye : Doç.Dr.Muhammet IŞIKLAN _____

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

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

Prof.Dr. İhsan ULUER
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

BİR YÜZEYİNDEN ISITILAN DÜZLEMSSEL MALZEMENİN KIZILÖTESİ TERMOGRAFI VE GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ İLE TAHRİBATSIZ MUAYENESİ İÇİN YENİ BİR SİSTEM

ARSLAN, Mevlüt

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ali ERİŞEN

Kasım 2011, 96 sayfa

Kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene, malzemenin kızılötesi bantta oluşturduğu sıcaklık profilinin değerlendirilerek düzensizlik ve kusurların algılanmaya çalışıldığı bir muayene yöntemidir. Bu muayene yönteminde, malzemede oluşan sıcaklık dağılımı incelenerek yüzeydeki ve yüzeyin altındaki anormallikler, hasarlar, üretim hataları, çatlaklar tespit edilir. Kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene, malzemenin iç yapısı ve iç yapısındaki hasarlar hakkında bilgi verirken bu esnada malzeme iç yapısında herhangi bir değişikliğe sebebiyet vermemektedir. Ayrıca kızılötesi ışınlar iyonlaştırıcı özelliğe sahip olmadığından hem malzeme hem de canlı açısından radyasyon güvenlik sorunu da oluşturmamaktadır. Bu bakımdan kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene teknikleri kullanışlı teknikler olup, gün geçtikçe yaygınlaşmaktadırlar.

Bu çalışmada, bir yüzeyinden ısıtılan düzlemsel malzemenin kızılötesi termografi ile belirlenen yüzey sıcaklık dağılımı görüntü işleme teknikleri ile analiz edilerek tahribatsız muayenesi için yeni bir sistem geliştirilmiştir. Kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene için laboratuarda; kızılötesi kamera, ısı kaynağı, bilgisayar ve geliştirilen yazılım gibi temel bileşenleri içeren bir test düzeneği oluşturulmuştur. Bu test düzeneği ile elde edilen termal görüntülerin ve termal görüntülerden elde edilen sıcaklık dağılımının görüntü analizleri yapılarak malzemenin iç yapısında herhangi

bir hasarın olup olmadığını, hasar var ise kaç tane hasar olduğunu, hasarın boyutunu ve yerini (malzemedeki konumunu ve ölçüm yapılan yüzeye olan uzaklığını/derinliğini) tespit eden bir bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında sunulan yeni yaklaşım doğrultusunda ve görüntü işleme teknikleri kullanılarak geliştirilen yazılım, hasar özellikleri/değerleri bilinen malzemelerle test edilmiş ve kabul edilebilir yanılma payı ile başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Tahribatsız Muayene, Kızılötesi Termografi, Sıcaklık Dağılımı, Görüntü İşleme

ABSTRACT

A NEW SYSTEM FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF ONE-SIDED HEATED FLAT MATERIAL USING INFRARED THERMOGRAPHY AND IMAGE PROCESSING TECHNIQUES

ARSLAN, Mevlüt

Kırıkkale University

The Graduate Scholl of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, Doctor of Philosophy (PhD) Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ali ERİŞEN

November 2011, 96 Pages.

Infrared thermography in non-destructive testing (IRNDT) is used for non-contact inspection of materials and components by visualizing thermal surface contrasts after a thermal excitation. The imaging modality combined with the possibility of detecting and characterizing defects as well as determining material properties makes infrared thermography a fast and robust testing method even in industrial/production environments. This technique provides a fast, safe, non-contact and non-destructive tool for evaluation of sub-surface defects, cracks, damages and delaminations in composites, metals, ceramics, polymers, thin films, sandwich panels and coated materials. For these reasons infrared thermography has become a popular technique in the field of non-destructive testing in recent years.

In this study, a new system for non-destructive testing of one-sided heated flat material using infrared thermography and image processing techniques has been developed. To perform this operation; infrared camera, heat source and computer containing a test rig was setup in our laboratory and a computer software has been developed to estimating the parameters of defects. This method does not require knowledge of material thermal properties or the value of the incident heat flux for estimation of defect parameters. The computer software developed using image processing techniques has been validated by estimating the parameters of defects of

various sizes and at different depths from experimental and simulated surface temperature evolutions. Software developed using image processing techniques and new approach presented in this thesis has been tested and successful results were given.

Key Words: Non-Destructive Testing, Infrared Thermography, Temperature Distribution, Image Processing

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında değerli bilgileriyle yol gösteren ve her türlü yardımlarını esirgemeyen Tez Yöneticisi Değerli Hocam Sayın Prof. Dr. Ali ERİŞEN'e, Tez İzleme Komitesindeki fikirleriyle teze katkı sağlayan Değerli Hocalarım Sayın Prof. Dr. Şeref SAğIROğLU ve Sayın Prof. Dr. Yahya DOğU'ya, akademik çalıŐmalarımnda bana kolaylıklar sağlayan ve destek olan başta Sayın Doç. Dr. S.Gkhun TANYER, Sayın Doç. Dr. Cemil B. EROL ve Sayın Dr. M.Alper KUTAY olmak üzere tüm TÜBİTAK BİLGEM UEKAE İLTAREN ailesine, tez çalıŐmalarım esnasındaki yardımlarından dolayı Sevgili ArkadaŐlarım M. Mehmet YORULMAZ, M. Cemil İŐLER ve mit AKŐUN'a, bu günlere gelmemdeki fedakrlıklarından ve her türlü desteklerinden ötürü Aileme ve son olarak bana birçok konuda olduğu gibi tez çalıŐmam boyunca da desteğini ve anlayıŐını esirgemeyen EŐime buradan teŐekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. Tahribatsız Muayene	4
2.2. Kızılötesi Termografi	11
2.1.1. Elektromanyetik Görünge	12
2.1.2. Elektro-Optik Görünge	17
2.1.3. Kızılötesi Enerji	18
2.1.3.1. Kirchhoff Yasası	19
2.1.3.2. Planck Yasası.....	20
2.1.3.3. Wien Yasası	21
2.1.3.4. Stefan Boltzman Yasası.....	21
2.1.4. Kızılötesi Kamera	22
2.1.5. Termal Görüntüleme	24
2.1.5.1. Termal Görüntüleme Kullanım Alanları.....	26
2.3. Kızılötesi Termografi ile Tahribatsız Muayene	28
2.3.1. Kızılötesi Termografi ile Tahribatsız Muayene Türleri.....	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM	32
3.1. Test Sisteminin Genel Yapısı ve Bileşenleri	32
3.1.1. Kızılötesi Kamera	33
3.1.2. Isı Kaynağı	34
3.1.3. Bilgisayar ve Geliştirilen Yazılım.....	34
3.2. Test İşlemleri	35
3.2.1. Testlerde Kullanılan Numuneler	36

3.3. Testin Yöntemi	37
3.3.1. Örnek Testler	38
3.3.1.1. Örnek Test 1	38
3.3.1.2. Örnek Test 2	39
3.4. Yazılım Geliştirilmesi	41
3.4.1. Sayısal Görüntülerin Analizi.....	41
3.4.2. Hasarların Analizi	42
3.4.2.1. Piksel Değerlerinin Analizi.....	42
3.4.2.2. Dairesel Hasarların Analizi.....	45
3.4.2.3. Dikdörtgensel Hasarların Analizi.....	49
3.4.2.4. Çizgisel Hasarların Analizi.....	52
3.4.3. Görüntü İşleme Çalışmaları ve Hasarları Belirleme	53
3.4.3.1. Sayısal Görüntülerinin Elde Edilmesi	57
3.4.3.2. Görüntü İşleme Çalışmaları	57
3.4.3.3. Hasarların Belirlenmesi	59
3.5. Test Prosedürü	69
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	71
4.1. Yapılan Tahminlerde Hata Oranları	71
4.2. Geliştirilen Yazılımın Test Edilmesi	74
4.2.1. Test 1	74
4.2.2. Test 2	77
5. SONUÇLAR	80
KAYNAKLAR	86
EKLER.....	93
EK-1. Flir i50 Kızılötesi Kamera Teknik Özellikler Çizelgesi	93
EK-2. Geliştirilen Yazılımdan Örnek MATLAB Kodu	94
ÖZGEÇMİŞ.....	95

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Radyografi yöntemi.....	7
Şekil 2.2. Sıvı penetrant yöntemi.....	8
Şekil 2.3. Ultrasonik muayene.....	9
Şekil 2.4. Kızılötesi termografi yöntemi.....	11
Şekil 2.5. Elektromanyetik görüngen.....	13
Şekil 2.6. Elektro-Optik görüngen.....	17
Şekil 2.7. Kızılötesi kameranın genel blok yapısı.....	23
Şekil 2.8. Matris sezimci dizin yapısı.....	24
Şekil 2.9. Termal görüntüleme.....	24
Şekil 2.10. Çeşitli termal görüntüleme sistemleri.....	25
Şekil 2.11. Çeşitli termal görüntüler.....	26
Şekil 2.12. Askeri uygulamalardan alınan çeşitli termal görüntüler.....	27
Şekil 2.13. Medikal uygulamalardan alınan çeşitli termal görüntüler.....	27
Şekil 2.14. Endüstriyel uygulamalardan alınan çeşitli termal görüntüler.....	28
Şekil 2.15. Aktif termografide ısıtıcıların yerleştirilme türleri.....	31
Şekil 3.1. Kızılötesi termografi sisteminin blok yapısı.....	32
Şekil 3.2. Kızılötesi termografi sisteminin genel görünümü.....	33
Şekil 3.3. Flir i50 kızılötesi kamera.....	33
Şekil 3.4. Isı kaynaklarının sistemde görünümü.....	34
Şekil 3.5. Kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene işlemi test düzeneği.....	36
Şekil 3.6. Testlerde kullanılan levha şeklindeki malzemeler.....	37
Şekil 3.7. Oluşturulan örnek hasarların görünümleri.....	37
Şekil 3.8. Isıtılan epoksi levhadan elde edilen termal görüntüler-1.....	38
Şekil 3.9. Isıtılan epoksi levhadan elde edilen termal görüntüler-2.....	39
Şekil 3.10. Isıtılan kompozit levhadan elde edilen termal görüntüler.....	40
Şekil 3.11. Sayısal resmin temel yapısı.....	42
Şekil 3.12. Dört bitlik gri seviye sayısal resim ve piksel değerleri.....	42
Şekil 3.13. Test görüntüsünde piksel değerlerinin incelenmesi.....	44
Şekil 3.14. Levha üzerindeki dairesel hasarların görünümü.....	45

Şekil 3.15. Dairesel hasarların analiz edilmesi-1.....	46
Şekil 3.16. Dairesel hasarların analiz edilmesi-2.....	47
Şekil 3.17. Dairesel hasarların analiz edilmesi-3.....	49
Şekil 3.18. Dikdörtgensel hasarların analiz edilmesi.....	50
Şekil 3.19. Dikdörtgensel hasarların iki ve üç boyutlu görüntüleri.....	51
Şekil 3.20. Çizgisel hasarların analiz edilmesi.....	52
Şekil 3.21. Dört bitlik gri seviye sayısal resim ve piksel değerleri.....	54
Şekil 3.22. Gri seviye test görüntüsü.....	55
Şekil 3.23. Hasarların ikili (binary) format görüntüleri.....	56
Şekil 3.24. Test görüntülerinin format dönüşümleri.....	56
Şekil 3.25. Görüntü işleme akış diyagramı.....	59
Şekil 3.26. Hasarları belirlemek için geliştirilen bilgisayar yazılımının arayüzü.....	60
Şekil 3.27. Hasar merkezinin konumunun belirlenmesi.....	61
Şekil 3.28. Hasarın çerçevesinin, genişlik ve yükseklik değerlerinin belirlenmesi... 61	
Şekil 3.29. Boyut (alan) hesabı için örnek hasar görüntüsü.....	63
Şekil 3.30. Hasar alan değerleri ve hesaplama.....	64
Şekil 3.31. IR133 kodlu test işleminde alınan test görüntüleri ve ısı farklılaşım.....	66
Şekil 3.32. Hasarlı ve hasarsız bölgelere ait piksel değerleri grafiği.....	67
Şekil 4.1. Hasar yarıçap tahminlerinde hata oranları.....	72
Şekil 4.1. Test 1 numunesinde hasarların görünümü ve hasar değerleri.....	75
Şekil 4.2. Test 1 görüntü serisinin geliştirilen yazılıma yüklenmesi.....	75
Şekil 4.3. Test 1 için hasar gerçek ve sonuç değerleri grafiği.....	76
Şekil 4.4. Test 2 numunesinde hasarların görünümü ve hasar değerleri.....	77
Şekil 4.5. Test 2 görüntü serisinin geliştirilen yazılıma girilmesi.....	78
Şekil 4.6. Test 2 için hasar ve sonuç değerleri grafiği.....	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Elektromanyetik görünye.....	14
Çizelge 2.2. Çeşitli renkler için yaklaşık frekansları ve boşluktaki dalga boyları.....	15
Çizelge 3.1. Alan değerleri	63
Çizelge 3.2. Hasarlı (10 farklı bölge) ve hasarsız bölgelere ait piksel değerleri	66
Çizelge 3.3. Eşitlik (3.2)'den hesaplanan $C1.x$ değerleri	67
Çizelge 3.4. Eşitlik (3.4)'ten hesaplanan $Cd.x$ değerleri	68
Çizelge 3.5. IR133 kodlu test işlemi için elde edilen tahmin sonuçları.....	68
Çizelge 3.6. IR132 kodlu test işlemi için elde edilen tahmin sonuçları.....	69
Çizelge 4.1. IR133 kodlu test işlemi için yapılan tahminlerdeki hata oranları.....	72
Çizelge 4.2. IR132 kodlu test işlemi için yapılan tahminlerdeki hata oranları.....	73
Çizelge 4.3. Test 1 için hasar ve sonuç değerleri.....	76
Çizelge 4.4. Test 1 için hata oranları	77
Çizelge 4.5. Test 2 için hasar ve sonuç değerleri.....	78
Çizelge 4.6. Test 2 için hata oranları	79

1. GİRİŞ

Kızılötesi termografi, günümüzün en ileri ve en popüler sıcaklık ölçüm tekniklerinden birisi olup farklı alanlarda, farklı uygulamalar için kullanılmaktadır [1]. Kızılötesi ile görüntü alma tekniği olarak tanımlanan kızılötesi termografinin tahribatsız muayene uygulamalarında kullanılmasında temel prensip ise; madde içerisindeki anormalliklerden dolayı maddenin ısı akımının değişmesidir [2]. Isı akımındaki değişiklikler, madde yüzeyinde kısmi sıcaklık değişimine neden olmaktadır. Bu temel prensip çerçevesinde şekillenen ve malzemenin kızılötesi bantta oluşturduğu sıcaklık profilinin değerlendirilerek düzensizlik ve kusurların algılanmaya çalışıldığı bir muayene yöntemi olarak tanımlanan kızılötesi termografide, malzemedeki sıcaklık dağılımı incelenerek yüzeydeki ve yüzeyin altındaki anormallikler, hasarlar, üretim hataları, çatlaklar vb. tespit edilir[3]. Bir tahribatsız muayene türü olarak kızılötesi termografinin başlıca kullanım alanları aşağıdaki gibidir [4-10]:

- Üretim esnasında oluşan boşlukların (örneğin; kompozit malzemelerde üretim sırasında oluşan hava boşluklarının) tespiti,
- Eklerdeki ayrılmaların tespiti,
- Hasar görmüş ve kırılmış yapı bileşenlerinin tespiti,
- Çatlakların tespiti,
- Katmanlı parçalardaki yabancı cisimlerin ya da tabakaların tespiti,
- Kompozit katmanlı yapılardaki üretim sırasında oluşan katmanlar arasındaki istenmeyen sıvı kirlenmesinin tespiti,
- Metalik katmanlı parçalar üzerindeki aşınmanın (corrosion) tespiti,
- Çarpma darbelerinin verdiği hasarların tespiti,
- Nemin verdiği hasarların tespiti,
- Elektrik ve hidrolik sistemlerindeki aşırı ısınmaların tespiti,
- Uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılan kompozit malzemelerin testi,
- Metal endüstrisi ve inşaat sektörü ile ilgili testler.

Kızılötesi termografiyi diğer tahribatsız muayene yöntemlerinden üstün kılan avantajları aşağıdaki gibidir [11]:

- İşlemlerin diğer muayene tekniklerine göre hızlı olması,
- Temassız olması,
- Malzeme iç yapısında herhangi bir değişikliğe sebebiyet vermemesi,
- Kızılötesi ışınlar iyonlaştırıcı özelliğe sahip olmadığından hem malzeme hem de canlı açısından radyasyon-güvenlik sorunu oluşturmaması,
- Sonuçların kolaylıkla ilgili formatlara dönüştürülmesi (resim formatı),
- Uygulamaların yaygın olması.

Kızılötesi termografi yönteminin tahribatsız muayene yöntemi olarak kullanılmasında karşılaşılan bir takım zorluklar dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu dezaavantajlar aşağıdaki gibidir [12-15]:

- Termal kayıpların termal görüntülerdeki netliğe etki etmesi,
- Kızılötesi kameraların fiyatlarının yüksek olması,
- Sadece yüzeyin ve yüzeyin alt kısmının incelenebilmesi,
- İncelenecek malzemelerin inceliği ile ilgili sınır olması,
- Yüzeyi parlak malzemelerin testinde yansıma ve parlama sorununun ortaya çıkması,
- Test edilecek cisimlerin düşük yayıcılığa sahip olması (emissivity, ϵ).

Bu çalışmada, bir yüzeyinden ısıtılan düzlemsel malzemenin kızılötesi termografi ile belirlenen yüzey sıcaklık dağılımı görüntü işleme teknikleri ile analiz edilerek tahribatsız muayenesi için yeni bir sistem geliştirilmiştir. Kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene için laboratuarda; kızılötesi kamera, ısı kaynağı, bilgisayar ve geliştirilen yazılım gibi temel bileşenleri içeren bir test düzeneği oluşturulmuştur. Bu test düzeneği ile elde edilen termal görüntülerin ve termal görüntülerden elde edilen sıcaklık dağılımının görüntü analizleri yapılarak malzemenin iç yapısında herhangi bir hasarın olup olmadığını, hasar var ise kaç tane hasar olduğunu, hasarın boyutunu ve yerini (malzemedeki konumunu ve ölçüm yapılan yüzeye olan uzaklığını/

derinliğini) tespit eden bir bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında sunulan yeni yaklaşım doğrultusunda geliştirilen yazılımda görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Tahribatsız Muayene

İnsanların yaşamları boyunca, seyahat ederken, televizyon seyredirken veya imalatta sorunsuz çalışan sistemlerle karşılaşılması beklenir. Çoğu zaman da, hayatların emanet edildiği ve gün geçtikçe daha da otomatikleşen cihaz ve sistemlerden doğabilecek riskleri düşünmek yerine bunların imalatçısına ve tasarımcısına güvenmek zorunda kalınır. İşte bu yüzden imalatta bu sorumluluğu alan üreticiler, ürettikleri mamulleri bir çok ayrıntılı test ve muayeneden geçirmek zorundadırlar. Bu test ve muayenelerin en çok kullanılanları tahribatsız muayene yöntemleri başlığı altında incelenir. Tahribatsız muayene, kalite kontrolün bir bölümü olup, üretimin tamamlayıcı bir parçasıdır. Tanım olarak, tahribatsız muayene, malzemenin herhangi bir şekilde bütünlüğünü ve kullanılabilirliğini bozmadan yüzeyinde ve iç yapısında bulunan hatalarının ve metalurjik durumunun test edilmesidir [16]. Bu yöntemler örnekleme yapılarak ya da üretimin kalitesinin %100 kontrolü şeklinde kullanılabilir. Yüksek teknoloji ile birlikte, üretimin her safhasında ve kullanım ve işletim sırasında da uygulanabilmektedir. Kontrolün verimli olabilmesi için, test edilen malzeme hakkında en üst seviyede bilgi edinmek gerekir. Tahribatsız muayene sadece standardın altında olan ürün ve malzemeleri reddeden bir yöntem değil, aynı zamanda iyi olan malzemenin güvencesi olan bir yöntemdir. Bu yöntemde birçok prensibin birleşimi kullanılmakta olup, tüm istekleri karşılayan tek bir yöntem bulunmamaktadır [17].

Tahribatsız muayene yöntemlerinin malzemeye zarar vermiyor olması en önemli özelliği durumundadır. Bu yöntemler, tahribatlı yöntemlere göre daha hızlı olmaları, işletme anında ve sistem durdurulmadan uygulanabilir olmaları ve çoğu uygulamada sonuçların test anında alınması, bu yöntemlerin başlıca tercih sebepleridir [18].

Tahribatsız muayene yöntemleri üç ana grupta toplanabilir. Bunlar; yüzeysel yöntemler, hacimsel yöntemler ve birleşik yöntemlerdir. Bu teknik gruplarının her biri endüstriyel amaçlı olarak farklı alanlarda kullanılabilirler. Yüzeysel

yöntemler; malzemenin yüzeyinde ve hemen yüzey altında bulunan hasarların tespitinde uygulanmaktadır. Bunlar arasında; sıvı penetrant, manyetik parçacık ve girdap akımları yöntemleri sayılabilir. Hacimsel yöntemler ise, malzemede test bölgesinin tamamına nüfuz etmek suretiyle hasarların tespit edilmesini sağlayan yöntemlerdir. Hacimsel yöntemler arasında, radyografi, ultrasonik muayene, kızılötesi termografi sayılabilmektedir. Yüzeysel ve hacimsel yöntemlerden ayrı olarak, birleşik yöntemler olarak nitelenen yöntemlerden de sanayide sıkça yararlanılmaktadır. Bu yöntemlerin en önemli yönü, parçanın tamamının aynı anda test edilebilmesidir. Bu tip yöntemler arasında da, kaçak testi ve akustik emisyon tekniği sayılabilir [7].

Endüstride en çok kullanılan ve yukarıda sözü edilen üç grupta incelenebilen, tahribatsız muayene metotları şöylece sıralanabilir [6,19]:

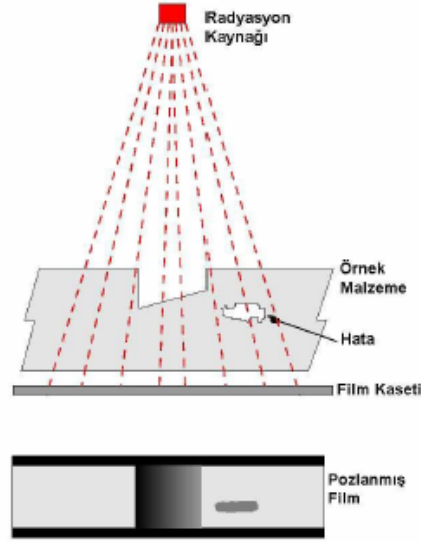
- Görsel Muayene
- Radyografi Yöntemi
- Magnetik Parçacık Yöntemi
- Penetrant Yöntemi
- Ultrasonik Muayene
- Girdap Akımları (Eddy Current) Yöntemi
- Kaçak Testi
- Kızılötesi Termografi

Görsel Muayene: Görsel Muayene, bir nesnenin doğrudan veya dolaylı olarak belirlenen kriterlere göre, bir insan tarafından iç ve dış yüzeylerinde renk farklılığı ve süreksizlikler, hatalar olup olmadığının, eğer var ise kabul veya red olup olmadığının kararının verildiği, parça ayırımının yapıldığı bir değerlendirme metodudur [20]. Özel ışıklandırma ile parçaların dış yüzeyleri gözle kontrol edilebilir, gerektiğinde stereo mikroskop incelemesi yapılabilir. Görsel kontrol çok hızlı olması, pahalı bir kontrol metodu olmaması, diğer tahribatsız muayene metotlarına ihtiyacı azaltması, minimum yüzey hazırlamaya ihtiyaç göstermesi, her zaman uygulanabilirlik ve hatayı direk olarak kuşku götürmez bir şekilde ortaya çıkarması gibi pek çok avantajlara sahiptir. Diğer yandan görsel kontrolün çok çeşitli dezavantajları da vardır. Bunlar; yalnızca parçaların yüzeylerinin görülebilmeleri iç yapı hakkında bir

bilgi vermemesi, parça üzerindeki bulguların kontrol eden personelin tecrübesine göre değişkenlik göstermesi, yüzey hazırlama ve temizleme işlemlerinin uygunluğu veya uygunsuzluğu, göz yanılmaları, yetersiz aydınlatmalar, personelin dalgınlığı, dikkatinin dağılması (iş körlüğü) gibi olumsuzluklar olarak sayılabilir.

Radyografi Yöntemi: X-ışınları malzemelere zarar vermeden iç yapılarını inceleme olanağı sağladığından, tahribatsız muayenede yaygın olarak kullanılmaktadırlar. X-ya da gama(γ)- ışınlarıyla malzemelerdeki kalınlık değişimleri, yapısal değişiklikler, içteki hatalar, montaj detayları tespit edilebilmektedir. X- ve gama(γ)- ışınlarının dalga boyları çok küçük olduğundan gözle görülmezler ve malzemeleri delebilmekle yetenekleri vardır. X- ve gama(γ)- ışınları, ışık ile aynı özelliklere sahip olup, gümüş kristallerini fotoğraf filmi üzerinde metalik gümüşe çevirirler ve filme ulaşan radyasyon yoğunluğu oranına göre bir resim oluştururlar. Endüstriyel radyografide en temel kural, malzemenin bir tarafında ışın kaynağının, diğer tarafında ise bir algılayıcının (detektör) bulunmasıdır. Radyasyon kaynağı olarak X- yada gama(γ)- ışın kaynağı, detektör olarak da film kullanılmaktadır. Filmin kararması kısaca yoğunluk olarak adlandırılmaktadır. Filmde farklı yoğunlukların olması, test edilen parçada farklı yapıların olduğunu göstermektedir. Filmin fazla radyasyon alan kısımları daha fazla kararır. Bunun anlamı, bu bölgede film yoğunluğu yüksektir. Örneğin, malzemedeki bir boşluk film üzerinde daha siyah olarak görülür. Radyografinin şematik olarak gösterimi Şekil 2.1'deki gibidir. Burada radyasyon kaynağı X- ışını veya gama(γ)- ışını olabilir. Pozlanmış filmde test sonucu şekilde net olarak gözükmektedir.

Radyografi yönteminin sonucun resim olarak görüntülenmesi, test ortamından farklı bir yerde ve zamanda görülebilecek kalıcı kayıt sağlaması, ince parçalar için uygun olması, hassasiyetin her film üzerinde gösterilmesi ve herhangi bir malzemede uygulanabilir olması gibi avantajlarının yanı sıra genel olarak kalın parçalarda uygun olmaması, sağlık için zararlı olabilmesi, iki boyutlu hatalar için direkt ışın gerekli olması, filmin pozlanması ve görüntülenmesi gerekliliği, yüzey hataları için uygun olmaması ve yüzeyin altındaki hatanın derinliği hakkında bilgi vermemesi gibi dezavantajları vardır [21].

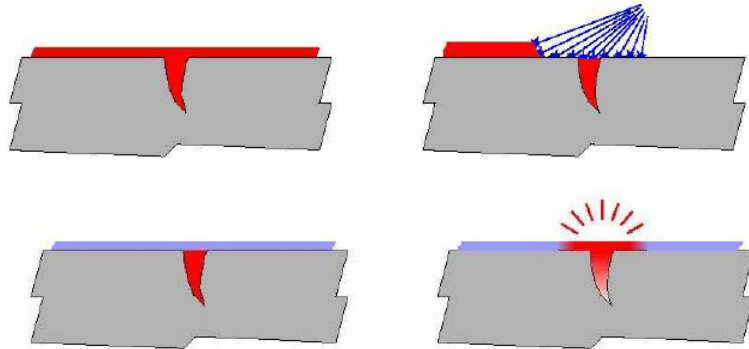


Şekil 2.1. Radyografi yöntemi [21]

Magnetik Parçacık Yöntemi: Bu tahribatsız muayene yönteminde manyetizma kullanılmaktadır. Yani muayene edilecek parça veya muayene edilecek alan magnetize edilmektedir. Bu yöntem ile genellikle yüzey ve yüzeye yakın alandaki çatlak şeklindeki malzeme ayrılmaları tespit edilebilir. Belirli koşullar altında döküm parçalarda ve kaynak dikişlerinde yüzeye yakın (yüzeyin hemen altındaki) hatalar da görüntüye getirilebilir. Ferromagnetik olan bütün çelik ve alaşımları ile dökme demirler muayene edilebilir çünkü ferromagnetik malzemelerin magnetik iletkenliği iyidir (permeabiliteleri yüksektir). Alüminyum ve ostenitik paslanmaz çelikler gibi ferromanyetik olmayan malzemelerin bu yöntem ile kontrolü mümkün değildir. Magnetizasyon sırasında magnetik alan çizgileri çatlaklarda olduğu gibi daha az iletken bir bölgeye geldiğinde, değişen magnetik iletkenlikten dolayı bir magnetik alan saçılması oluştururlar. Magnetik alandaki bu değişim, magnetik partikül muayenesinde temel oluşturur. Bir çatlak veya malzeme ayrılmasının oluşturduğu bu saçılan alan, magnetizasyon sırasında yüzeye kuru veya süspansiyon içerisinde uygulanan ve serbest olan demir ve demir oksit tozlarını çekmeye ve hatalı bölge üzerinde magnetik bir köprü oluşturmaya başlar. Bu şekilde çatlak veya malzeme ayrılması üzerinde oluşan toz yığını gözle görülerek hatalı bölge olarak tanımlanabilir. Magnetik Parçacık Yönteminin uygulamasının kolay olması, nicel olması ve otomasyona uygun olması gibi avantajlarının yanı sıra sadece

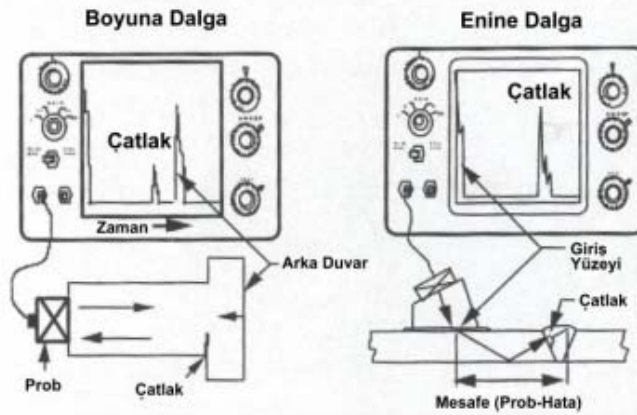
ferromagnetik malzemelerle sınırlı olması bununla birlikte sadece yüzey ve yüzeye yakın hataların tespitinin mümkün olması gibi dezavantajlara sahiptir [22-24].

Penetrant Yöntemi: Bu yöntem ferromagnetik olmayan malzemelerin yüzeylerindeki hataların tespitinde kullanılır (Şekil 2.2). Oldukça basit ve yaygın bir yöntemdir. Temel olarak kılcallık olayı ile ilgilidir. Tahribatsız muayenede kullanılan penetrantlar düşük gerilim ve yüksek kılcallığa sahiptir. Penetrant testinde, ilk olarak test edilecek parçanın yüzeyinin (dolayısıyla çatlakların içinin) kimyasal olarak temizlenip yağ, kir vb. yabancı maddelerden arındırılması gerekir. Penetrant, test parçasının yüzeyine uygulanır ve penetrantın yüzeye açık süreksizliklere kılcallık olayı ile girmesi için yaklaşık on beş dakika beklenir. Daha sonra süreksizliklerin içerisine girmeyen yüzeydeki penetrant giderilir. Süreksizliklere giren penetrantın dışarı çıkmasını sağlayan geliştirici ince bir tabaka olarak yüzeye uygulanır. Bu olaya ters kılcallık denir ve penetrantın daha geniş bir belirti oluşturmasını sağlar. Penetrantta tabii olan parçanın yüzeyi incelendikten sonra penetrant ve geliştiriciye ait kalıntıları gidermek için son temizlik yapılır. Penetrant yönteminin uygulaması kolaydır ve bütün metallere, plastik, seramik, mika, cam gibi malzemelere uygulanabilir. Otomasyona uygun olması ve nicel olması gibi avantajları da vardır. Bu yöntemin dezavantajları ise; Sadece yüzeye açık hataların tespitinde kullanılabilir olması, aşırı pürüzlü ve gözenekli yüzeylerin testinde sağlıklı sonuç alınamaması, hassasiyetin düşük olması ve önemli miktarda eriyen malzeme kullanılması şeklinde belirtilebilir.



Şekil 2.2. Sıvı penetrant yöntemi [24]

Ultrasonik Muayene: Çok yaygın olarak kullanılmamasına rağmen son yıllarda çok büyük gelişmeler sağlanan ultrasonik muayenenin prensiplerini Şekil 2.3 üzerinde şematik olarak görebiliriz. Bir ultrasonik hata algılayıcı cihaz, prob ve prob kablosundan ibaret olan bu sistemde x- eksenini zamanı (veya mesafeyi) y eksenini ise alınan piklerin şiddetini göstermektedir. Bu sistemde malzemenin içerisine yüksek frekanslı ses dalgaları gönderilerek malzemenin et kalınlığı veya malzemenin içerisindeki gaz boşluğu, katmer, çekinti boşluğu, kum boşluğu gibi hatalar tespit edilebilmektedir. Ultrasonik hata dedektörleri son yıllarda küçülmüş ve fonksiyonları da artmıştır. Portatif, kolay taşınabilir ve uzun süreli kullanıma imkan veren bataryalar, kalibrasyonları çok kolay yapılabilen cihazlar ultrasonik muayeneyi yeni elemanlara sevdiren avantajlar arasında sayılabilir. Bu avantajlar sayesinde birim zamanda yapılan muayenelerin sayısı artmakta ve yine güvenilirliği de artmaktadır [24-27].



Şekil 2.3. Ultrasonik muayene [24]

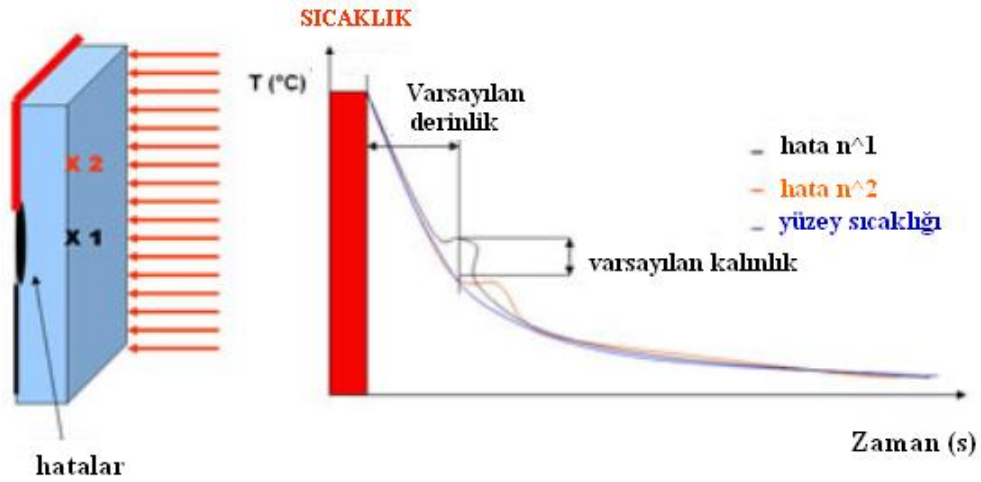
Girdap Akımları (Eddy-Current) Yöntemi: Temel olarak iletkenlerin incelenmesinin esası olan elektromagnetizmaya dayanmaktadır. Girdap akımları, elektromagnetik indüksiyon denilen proses doğrultusunda elde edilir. İçerisinden akım geçen bir iletkenin etrafı bir magnetik alanla çevrilidir. Bu magnetik alanın gücü, kendini oluşturan bu akımla direkt olarak ilişkilidir. Büyüklüğü değişen bu akım, örneğin zamana bağlı olarak değişen bir alternatif akım, palsli bir magnetik alan yaratır. Şayet elektrik iletkenliğine sahip bir malzeme bu magnetik alan içerisinde bırakılırsa, malzemenin içerisinde bir gerilim indüklenir. Malzeme iletken olduğunda bu gerilim

malzemenin içerisinde bir akım indükler. Bu akım “Eddy Current” (Eddy Akımı ya da Girdap Akımı) olarak bilinir. Eddy Akımı kendini oluşturan akımın özelliklerini taşır fakat doğrultusu terstir. Malzeme yüzeyindeki Eddy Akımı doğrudan doğruya kendini oluşturan akımın frekansı ile ilgilidir. Bu açıdan, Eddy Akımının etkilediği derinlik bu frekansın artmasıyla azalacaktır. Malzeme yüzeyinden içeride oluşan Eddy Akımları, yüzeyde oluşan akımların faz değişimleri ile ilişkilidir. Eddy Akımları şayet çatlak, boşluk, yüzey hasarları veya hatalı kaynak birleştirmeleri gibi malzeme kusurları ile karşılaşır, akışın olması gerektiği doğrultuda yayınamazlar. Bunun sonucunda magnetik alanda bir değişiklik oluşur, ve buna bağlı olarak test bobini de reaksiyon verir. Girdap akımları yöntemi çatlak tespitlerinde, malzeme ve kaplama kalınlığı ölçümlerinde, iletkenlik ölçümlerinde, ısı hasarlarının tespitinde vb. işlemlerde kullanılır [28].

Kaçak Testi: Temelinde bir parçanın içine veya dışına bir basınçlı su veya hava tatbik edilerek parçadan kaçak olup olmadığının kontrol edilmesi yöntemidir. Kaçak testinin hidrostatik veya pnömatik olup olmayacağına, nasıl bir kaçak testi yapılacağına parçaya göre karar verilir. En uygun kaçak testinin seçimi sırasında şu iki soru sorulmalıdır: bu kaçak testi şüpheli yani bir parçada kaçak olup olmadığının kontrolü için mi yapılacak yoksa bilinen bir kaçağın yerini göstermek için mi yapılacak? Diğer soru ise herhangi bir bilinen spesifik kaçağın miktarını ölçmek gerekli midir? Bu sorular bizim kaçağı tespit etmede hangi yöntemi kullanacağımızı ve neye ihtiyacımız olduğunu daha iyi anlamamızı sağlayacak sorulardır.

Kızılötesi Termografi: Tahribatsız muayene yöntemleri içinde hem hacimsel bir teknik olması hem de iyonlaştırıcı olmaması nedeniyle kızılötesi (infrared) ışınlarla geliştirilen teknikler ayrı bir öneme sahiptir. Zira, hacimsel yöntemlerde amaç, malzeme iç yapısı hakkında bilgi sahibi olmak, ancak bu esnada malzeme iç yapısında herhangi bir değişikliğe sebebiyet vermemektir [7,19]. Kızılötesi ışınlar iyonlaştırıcı özelliğe sahip olmadığından hem malzeme hem de canlı açısından radyasyon güvenlik sorunu da oluşturmamaktadırlar. Bu bakımdan kızılötesi ışınların kullanıldığı tahribatsız muayene teknikleri kullanışlı teknikler olup, gün geçtikte yaygınlaşmaktadırlar [29-34]. Kızılötesi tahribatsız muayene işleminde öncelikle hasarlı malzeme bir ısıtma tekniği kullanılarak belirli bir sıcaklığa gelene

kadar ısıtılır. Isıtma işlemi için lamba, kızılötesi lamba, rezistans, ultrasonik, mikrodalga vb. ısıtma sistemlerinden birisi kullanılabilir. Daha sonra yüzey sıcaklık değişimi izlenerek muayene işlemi gerçekleştirilir. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi malzemedeki hasarın kalınlığı ve derinliği, grafiksel olarak izlenen sıcaklık değişiminin gecikmesi ve genliği ile ilişkilidir. Malzemedeki iç hasar, yüzey sıcaklık değişimini etkiler. Bu etkinin incelenmesi ile de hasar hakkında bilgi edinilir.



Şekil 2.4. Kızılötesi termografi yöntemi

Kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene işleminde dikkat edilmesi gereken hususlar ise şunlardır [4]:

- Isıtmanın düzgün yapılması (uniformity of heating),
- Ölçüm işleminin hızlı yapılması (fast thermography),
- Isının yüzeyde düzgün soğurulması (surface absorption -emissivity-),
- Yüzeyden oldukça derinlerde olan hasarların belirlenmesinin zor olması.

2.2. Kızılötesi Termografi

Kızılötesi ışınım (infrared radiation), elektromanyetik radyasyon ailesi içinde yer alan bir ışınımdır. Günümüzde önemli uygulamaları olan kızılötesi ışınlar, halen üzerinde önemle çalışılan konular arasındadır. Nitekim, Max Planck'in radyasyon teorisini açıkladığı 14 Aralık 1900 tarihinden çok daha önceleri, sıcaklık ölçümü

insanlığın hep ilgisini çeken bir alan olmuştur ve kızılötesi termografi, günümüzün en ileri ve en popüler sıcaklık ölçüm tekniklerinden birisidir [1]. Kısaca, kızılötesi ile görüntü alma tekniği olarak tanımlanabilir. Farklı alanlarda, farklı uygulamalar için termografiden yararlanılabilmektedir. Temas gerektirmeyen ölçüm kolaylığı nedeniyle yaygın bir kullanım alanı mevcuttur. Termografinin temel prensibi; madde içerisindeki anormalliklerden dolayı maddenin ısı akımının değişmesine dayanır. Isı akımındaki değişiklikler, madde yüzeyinde kısmi ısı değişimine neden olmaktadır. Bu şekilde, yüzeyde termal şekiller oluşur. Bu termal şekillerin gözle görülebilir hale getirilmesi ise termografiyi oluşturur [2, 29].

Diğer bir ifade ile cisimlerden yayılan ve insan gözü tarafından algılanamayan kızılötesi enerjiden elde edilen bilginin görünür hale dönüştürülmesi termal görüntüleme teknolojisi tarafından sağlanır [35]. Mutlak sıfırın ($0^{\circ}\text{K}=-273^{\circ}\text{C}$) üstünde sıcaklığa sahip her cisim bir kızılötesi ışınım yapar. Bu ışınımın sebebi, atomların ve moleküllerin mutlak sıfırın üstündeki sıcaklıklarda dönme ve titreşme hareketleri yapmasıdır. Atomlar ve moleküller dönme yaparken kızılötesi enerji yayarlar [8]. Sıcaklık ne kadar fazla ise yayılan kızılötesi enerjide o kadar fazladır. Termal görüntüde nesnelere sahip oldukları farklı sıcaklıklar farklı renk tonlarında (genellikle gri veya yeşil tonlarında) gösterilir. Günümüzde, birçok alanda gözlem ve kontrol işlemleri için kullanılan termal görüntüleme sistemleri nesnelere kızılötesi bant içinde yayılan ve insan gözünün göremediği bantlardaki radyasyonu (elektromanyetik enerjiyi) görüntüye dönüştürür [29]. Kızılötesi Termografinin ne olduğunu daha iyi anlamak için kızılötesi bantı kapsayan elektromanyetik ve elektro-optik görüngeler ile kızılötesi enerjinin incelenmesi gerekir.

2.1.1. Elektromanyetik Görünge

Elektromanyetik görünge (electromagnetic spectrum) Şekil 2.5'te görüldüğü gibi, radyo dalgalarından, mikrodalgalardan, kızılötesi, görünür ve morötesi, Röntgen (X) ve Gamma (γ) ışınlarından oluşur [7]. Elektromanyetik görünge 1 mm den 0.75 μm ye kadar olan kısmı kızılötesi, 0.75 μm den 0.4 μm ye kadar olan kısmı görünür ışık, 0.4 μm den 0.01 μm ye kadar olan kısmının morötesi ve daha düşük dalga

boyundaki kısmı ise yüksek enerjili Röntgen (X) ve Gamma (γ) ışınları bölgeleridir [6]. Çizelge 2.1’de elektromanyetik görüngede yer alan radyasyon tipleri, dalga boyu ve frekans aralıkları verilmiştir. Radyasyon tiplerinin en önemli farkları bu dalga boyları veya frekanslarıdır. Gamma ışınlarından radyo dalgalarına doğru gidildikçe dalga boyu artarken frekans azalır. Bu radyasyon tiplerinin hepsi birer elektromanyetik dalgadır ve ışık hızı ile hareket ederler. Işık hızı vakumda $3 \cdot 10^8$ m/s dir. Dalga boyu ile frekans arasındaki ilişki;

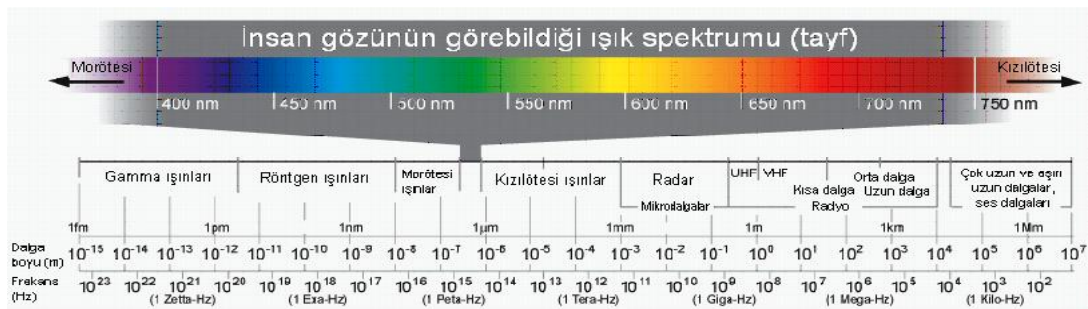
$$c = f \cdot \lambda \quad (1.1)$$

ile verilmektedir. Burada;

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sn (ışık hızı)}$$

f , frekans (Hz)

λ , dalga boyu (metre) olarak alınmaktadır.



Şekil 2.5. Elektromanyetik görünge [7]

Çizelge 2.1. Elektromanyetik görünye [7]

Radyasyon tipi	Dalga Boyu	Frekans (Hz)	Kuantum Enerjisi (eV)
Radyo Dalgaları	100km-300mm	$3 \times 10^3 - 10^9$	$1,2 \times 10^{-11} - 4 \times 10^{-6}$
Mikrodalgalar	300mm-0,3mm	$10^9 - 10^{12}$	$4 \times 10^{-6} - 4 \times 10^{-3}$
Kızılötesi	0,3mm-0,7 μ m	$10^{12} - 4,3 \times 10^{14}$	4×10^{-3} -1,8
Görünür	0,7 μ m-0,4 μ m	$4,3 \times 10^{14} - 7,5 \times 10^{14}$	1,8 - 3,1
Morötesi	0,4 μ m-0,03 μ m	$7,5 \times 10^{14} - 10^{16}$	3,1 - 40
X-Işınları	0,03 μ m-0,1nm	$10^{16} - 3 \times 10^{18}$	40 - $1,2 \times 10^4$
γ -Işınları	0,1nm-1pm	$3 \times 10^{18} - 3 \times 10^{20}$	$1,2 \times 10^4 - 1,2 \times 10^6$

Mikrodalgalar: Mikrodalga bölgesi 1 GHz'den yaklaşık 300 GHz'e kadar uzanır. Bu frekanslara karşılık gelen dalga boyları kabaca 1 mm'den 30 cm'ye kadar gider. Dünya atmosferine geçebilen ışınım yaklaşık 1cm'den 30 m'ye kadar uzanır. Bu yüzden mikrodalgalar uzay aracı haberleşmesinde ve radyo-astronomide kullanılır. Özellikle, uzayın büyük bir bölümüne dağılmış olan nötr hidrojen atomları 21cm'lik (1420 MHz) mikrodalgalar yayınlarlar. Kendi galaksimiz ve başka galaksilerin yapısı hakkında oldukça fazla bilgi, bu özel yayından toplanmıştır. Günümüzde mikrodalgalar, telefon konuşmalarını iletmekten televizyon istasyon bağlantılarına, piliç pişirmeden uçaklara yol göstermeye, hızlı sürücülerini yakalamaktan (radarla) evrenin köklerini araştırmaya, garaj kapılarını açmaktan gezegenlerin yüzeylerini görmeye kadar geniş bir alanda kullanılmaktadır.

Kızılötesi (Infrared, IR): Kabaca 1 THz'den yaklaşık 426 THz'e (0,7 μ m-3mm) kadar uzanan kızılötesi bölgesi ilk kez ünlü astronom Sir W. Herschel (1738-1822) tarafından 1800'de tespit edilmiştir. Elektromanyetik spektrumda görünür ışık ile mikrodalga arasında yer alır. Kızılötesi ışımının temel kaynağı ısıdır. Mutlak sıcaklığın (0°K=-273°C) üstündeki her cisim bir kızılötesi ışımaya yapar. Yani, eğer bir

cismin sıcaklığı $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ nin üstünde ise az veya çok bir kızılötesi ışımaya yapar. Bizim çok soğuk diye bildiğimiz nesnelere, örneğin buz bir kızılötesi ışımaya yapar. Eğer bir cismin sıcaklığı görünür ışık yayamayacak kadar düşük ise kızılötesi ışımaya yapar. Örneğin insan da $10\mu\text{m}$ civarında bir kızılötesi ışımaya yapar.

Görünür ışık: Görünür ışık yaklaşık $0,39\ \mu\text{m}$ den başlayıp $0,78\ \mu\text{m}$ ye kadar uzanır. Çizelge 1.2’de renklerin dalga boyları ve frekansları verilmiştir. Renk, ışığın kendi özelliği olmayıp, göz, sinirler ve beyinden oluşan elektrokimyasal duyu sisteminin bir algısıdır. Daha açık olarak “sarı ışık” yerine “sarı görünen ışık” demek daha doğrudur. Değişik frekans karışımları, göz – beyin algılama sisteminde aynı renge neden olabilir. Örneğin yeşil ışık demeti üzerine bir kırmızı ışık demeti binince göz sarı ışık algılar. Anlaşılacağı gibi göz – beyin algılama sistemi girişin ortalamasını alır. Renkli televizyon ekranı için sadece kırmızı, yeşil ve mavi üç fosfora gerek duyulmasının nedeni de budur.

Çizelge 2.2. Çeşitli renkler için yaklaşık frekansları ve boşluktaki dalga boyları [7]

Renk	Dalga boyu (nm)	ν (THz)
Kırmızı	780 – 622	384 - 482
Portakal	622 - 597	482 - 503
Sarı	597 - 577	530 - 520
Yeşil	577 - 492	520 - 610
Mavi	492 - 455	610 - 659
Mor	455 - 390	659 - 769

Morötesi (Ultraviolet, UV): Spektrumda morötesi bölgesi yaklaşık 30nm ile 390nm arasında kalır. J. W. Ritter tarafından keşfedilmiştir. Bu aralıktaki foton enerjileri $3,2\text{eV}$ ’dan 50eV ’a kadardır. Morötesi foton enerjileri birçok kimyasal tepkimeyi başlatabilecek mertebededir. Bu sayede, güneşten gelen ölümcül olabilecek ultraviyole ışınların enerjileri ozon tabakasında tepkime oluşturarak bu tabaka içinde harcanırlar ve böylece dünyaya ulaşmaları önlenmiş olur. Yaklaşık 290nm ’den daha

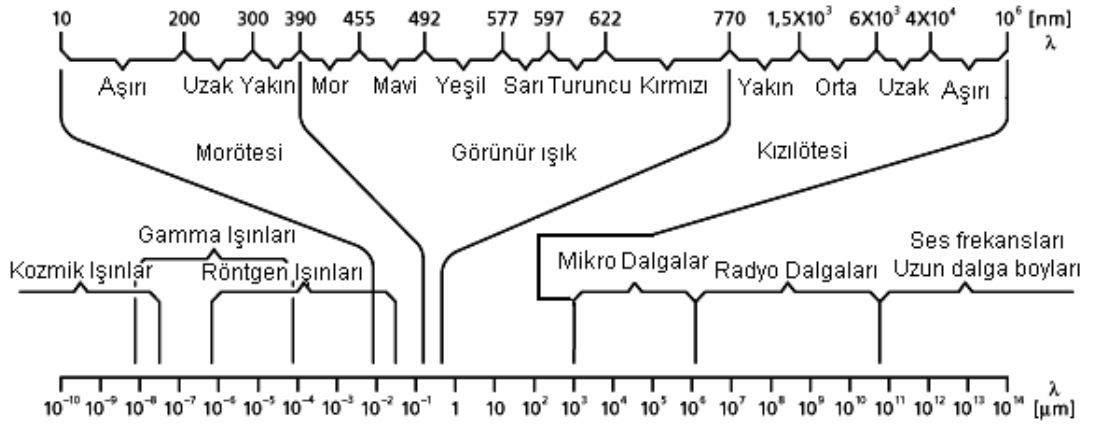
küçük dalga boylarındaki ultraviyole ışık mikrop öldürücüdür. İnsan sağlığına da zararlıdır. Dolayısıyla insan vücuduna direkt temas etmeyecek ortamlarda kullanılır. İnsanlar morötesi ışınları çok iyi göremezler. Çünkü, göz merceği 300nm'nin üstündeki ışınları daha çok soğururken, özellikle kısa dalga boylarında kornea soğurur. Ancak, katarakt yüzünden göz merceği alınan insanlar, bal arıları ve güvercinler morötesi ışınları görebilirler. Ultraviyole ışınlar, gıda sektöründe besinlerin içindeki mikropları öldürmede ve besinlerin çürüklerini ayırmada sıkça kullanılırlar. İnsan sağlığına zararlı olduğundan haberleşmede fazla kullanılmaz.

X-ışınları : X-ışınları 1895'de tamamen rastlantı sonucu W. C. Röntgen (1845-1923) tarafından keşfedilmiştir. Dalga boyları 30nm ile 0,1nm arasındadır. Foton enerjileri (kabaca 40eV ile 12KeV), X-ışını kuantumu teke tek bir tanecik biçiminde, enerji mermileri gibi, maddeyle etkileşebilecek büyüklükte dirler. X-ışını üretmenin en pratik yollarından biri, yüksek hızlı yüklü taneciklerin çok çabuk yavaşlatılmasıdır. Yüksek enerjili bir elektron demeti bakır gibi metal bir levhaya çarptığında, geniş frekans aralıklı frenleme ışınları ortaya çıkar. Bakır çekirdekleri ile çarpışmalar demet elektronlarının sapmalarına yol açar, bu da X-ışını fotonları çıkmasına neden olur. Ortaya çıkan kuantumlu yayımlar hedef atoma özgüdürler, enerji düzey yapısını ortaya çıkarırlar ve bu yüzden de onlara karakteristik ışınım denir. Bildiğimiz tıp film radyografisi, alışılan anlamda fotoğraf görüntülemesinden çok, basitçe gölge düşürmekten başka bir şey değildir. Görüntü için kullanışlı X-ışını mercekleri yapılamamıştır. Fakat, aynaların kullanıldığı modern odaklama yöntemleri ile yeni bir X-ışınları görüntüleme dönemi başlamıştır. Bunlarla fizyon topakçıklarından, güneş, uzak kuazarlar, ve kara delikler gibi baskın olarak X-ışınları bölgesinde yayım yapan milyonlarca derece sıcaklıktaki göksel kaynaklara kadar birçok şeyin ayrıntılı görüntüleri elde edilmiştir. Uydulardaki X-ışını teleskopları evrene açılan heyecan verici yeni bir göz sağlamıştır. X-ışını mikroskopları, pikosaniye hızında X-ışını kameraları, X-ışını kırınım ağları ve girişim ölçerleri vardır ve çalışmalar x-ışını holografisi üzerinde sürmektedir. 1984'de L. A. Livermore ulusal laboratuvarında bir grup, 20,6nm dalga boyunda ışık yayan lazer ışınımı üretmeyi başarmıştır. Bu tam olarak uç morötesinde (XUV) olmasına karşın, X-ışını bölgesine yeterince yakın olduğundan ilk yumuşak X-ışını lazeri olarak nitelendirilebilir.

Gama (γ) ışınları: Gama (γ) ışınları en düşük dalga boylu (0,1nm ile 1pm arasında) ve en yüksek enerjili (12KeV ile 1,2MeV) elektromanyetik ışınımlardır. Bunlar atom çekirdeği içinde geçişler yapan tanecikler tarafından yayınlanırlar [36].

2.1.2. Elektro-Optik Görünge

Optik görünge, morötesi, görünür ışık ve kızılötesi bantlarından oluşmaktadır. Şekil 2.6'da elektro-optik görünge detaylı yapısı verilmektedir. Optik görünge alt ve üst sınırları, enerji kaynağına ve ölçüm yöntemine göre komşu görüngelerle örtüşebilir [7].



Şekil 2.6. Elektro-Optik görünge [7]

Kızılötesi görünge atmosferin iletim bantlarına göre dört alt bölgeye ayrılmaktadır. Kızılötesi bantlar ve sınırları şu şekildedir [37]:

- Yakın kızılötesi bantı: Görünür ışık bantının üst sınırı olan 0,75-0,78 μm dan 1,5-3 μm ya kadar olan banttır.
- Orta kızılötesi bantı: 1,5-3 μm dan 8 μm ya kadar olan banttır.
- Uzak kızılötesi bantı: 8 μm dan 15-40 μm ya kadar olan banttır.
- Aşırı uzak kızılötesi bantı: Dalga boyu 15-40 μm yu geçen yayılım bantıdır.

Bu alt grupların sayısı dalga boylarının sınırı kesin değildir ve adlandırmada genel bir kabul sağlanamamıştır.

2.1.3. Kızılötesi Enerji

Kızılötesi dalga boyundaki enerji ısı kaynaklıdır. Bütün cisimler belirli seviyede sıcaklığa sahip olduğu için her biri dış ortama kızılötesi dalga boyunda enerji yayarlar. Örneğin elektrik ısıtıcıları, sobalar ve ev radyatörleri gibi sıcak cisimlerden sürekli kızılötesi ışık yayınlanırlar. Güneşten gelen elektromanyetik enerjinin yaklaşık yarısı kızılötesidir. Bildiğimiz ışık ampülü gerçekte görünür ışıktan fazla kızılötesi ışımaya yapar. Cisimlerin sahip oldukları ısı enerjisi hem kendi içlerinde meydana gelen sıcaklık artması veya azalması ile olabileceği gibi dış etkilere örneğin güneşten kaynaklanan nedenlerle de olabilir. Yani tüm nesnelerin termal radyasyon yayma özelliği dışında başka kaynaklardan gelen enerjiyi soğurma özelliğinin de olduğu bilinmektedir [38]. Gündüz güneş tarafından ısıtılan nesnelerin sahip oldukları termal enerjiyi gece boyunca çevrelerine yaymaları buna örnek olarak verilebilir. Yayılan enerjinin hangi dalga boyunda yoğunlaştığı ve yayılan toplam enerji miktarı nesnenin sıcaklığına bağlıdır. İnsan vücudu ve çevremizde karşılaştığımız bir çok nesne 30 °C civarında bir sıcaklığa sahiptir. Dolayısıyla birçok nesne ve insanlar da sürekli kızılötesi yayımlar. İnsan vücudu yaklaşık 3 µm den başlayan, 10µm civarından doruğa ulaşan ve oradan zayıflayarak aşırı kızılötesi ışınımaya giden ve ötesinde ihmal edilebilen kızılötesi enerji yayımlar. Bununla birlikte cisimlerin sıcaklıkları ile yaydıkları enerji arasında güçlü bir ilişki vardır. Örneğin sıcaklığı 2 katına çıkarılan bir cismin etrafına yaydığı enerji 16 kat artar [39].

Radyasyon (ışımaya) yolu ile ısı yayılımı: Mutlak sıfırın (0°K=-273°C) üstünde sıcaklığa sahip her cisim bir kızılötesi ışımaya yapar. Bu ışımanın sebebi, atomların ve moleküllerin mutlak sıfırın üstündeki sıcaklıklarda dönme ve titreşme hareketleri yapmasıdır. Atomlar ve moleküller dönme yaparken kızılötesi enerji yayarlar. Sıcaklık ne kadar fazla ise yayılan kızılötesi enerji de o kadar fazladır. Kirchhoff, Planck, Wien ve Stefan-Boltzman yasaları kızılötesi ışınımı ve yayılan enerji miktarını betimleyen dört temel yasadır.

2.1.3.1. Kirchhoff Yasası

Kirchhoff, iyi bir soğurucu olan bir malzemenin aynı zamanda iyi bir kaynak olduğunu bulmuştur. Kirchhoff aynı sıcaklıktaki tüm materyallerin yaydığı güç ve soğurma katsayı oranlarının aynı olduğunu, bu oranın sıcaklık ve dalga boyuna bağlı olarak değiştiğini ve materyalin şeklinden bağımsız olduğunu ispatlamıştır [29].

Siyah Cisim (Blackbody): Her maddenin kendine has kızılötesi radyasyon spektrumu mevcuttur. Sonsuz sayıda partikülden oluşmuş bir cisim düşünüldüğünde, bu cismin rezonans frekansı tüm kızılötesi bölgeyi hiç boşluk bırakmadan kapsıyor ise, böyle bir cisme “siyah cisim” adı verilmektedir. Bu tanım doğrultusunda, siyah cisim aynı zamanda ideal kızılötesi radyasyon yayımlayıcıdır [4].

Siyah cisim mükemmel yayımlayıcı, mükemmel soğurucu (üzerine gelen bütün radyasyonu emen), fiziksel radyasyon kanunlarının formüle edildiği mükemmel maddedir. Bu bağlamda, siyah cisim doğada olmayan, ideal veya mükemmel cisim olmaktadır. Bununla birlikte, genel radyasyon kanunlarının uygulamalarında yaygın kullanılan bir kavramdır.

Cismin Yayılcılığı (Emissivity, ϵ): Bir yüzey özelliği olan cismin yayıcılığı (emissivity, ϵ) yüzeyin enerjiyi yayma kabiliyetidir ve bir cismin yaptığı yayılımın siyah bir cismin yaptığı yayılıma oranına cismin yayıcılığı denir. Yayılcılığı dalga boyu ile değişmeyen ancak siyah cisim kadar da ışıma yapmayan cisimlere gri cisim denir. Yayılcılığı, yapılan yayılımın dalga boyu ile değişen cisimlere ise değişken ışıyıcı denir. Siyah cismin yayıcılığı 1 kabul edilmiştir. Ama gerçekte hiçbir cismin yayıcılığı 1 değildir. Siyah cisim dışındaki bütün cisimlerin yayıcılığı ise 1'den küçüktür. Cisimlerin yayıcılığı 0 (mükemmel yansıtıcı) ile 1 (mükemmel yayıcı ve aynı zamanda mükemmel yutucu, yani siyah cisim) arasında bir değer olup sıcaklığın ve dalga boyunun bir fonksiyonudur. Örneğin demirin yayıcılığı 800°C de $\lambda=0,65\mu\text{m}$ için $\epsilon=0,37$, $\lambda=1,2\mu\text{m}$ için $\epsilon=0,29$ dur.

Bir yüzey düşük yayıcılık değerine sahipse bir ayna gibi davranır ve ölçüm işlemi zorlaşır. Çünkü yüzeyin etrafında yer alan diğer sıcak komşu nesnelere ölçüm için asıl olmayan enerji yayarlar. Düşük veya düzgün olmayan yayıcılık problemlerine karşı çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bunlardan birisi, incelenen yüzeyin yüksek yayıcılığı olan flat paint ($\epsilon=0,9$) ile kaplanmasıdır. Bu metod görüntü uygulamalarında oldukça yaygındır [4].

2.1.3.2. Planck Yasası

Siyah bir cismin belirli bir dalga boyunda yaptığı ışınım gücü ;

$$W(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (1.2)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada;

W: Işınım gücü ($\text{W/m}^2/\mu\text{m}$),

c: Işık hızı ($2,998 \cdot 10^8$ m/s),

k: Boltzmann sabiti ($1,38054 \cdot 10^{-23}$ JK⁻¹),

λ : Dalga boyu (μm),

T: Sıcaklık (K),

h: Planck sabiti ($h=6,6256 \cdot 10^{-34}$ Js²)'dir.

Planck Yasası, dalga boyu başına birim zamanda birim yüzey alana düşen güç miktarını verir.

2.1.3.3. Wien Yasası

Planck yasası, belli bir sıcaklık için dalga boyunun fonksiyonudur. Planck Yasasından faydalanarak belirli bir sıcaklık için ışınımın en yüksek olduğu dalga boyu bulunabilir.

$$\frac{dW_\lambda}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left[\frac{1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1} \right] = 0 \quad (1.3)$$

buradan Wien yasası;

$$\lambda_{\max} T = 2,898.10^{-3} \mu\text{m}.K \quad (1.4)$$

Burada elde edilen Wien Yasası'da kızılötesi ışınım için önemli bir yasadır. Sıcaklık arttıkça dalga boyu (λ) daha küçük değere doğru kayar. Elektromanyetik radyasyon ailesi içinde termal bölge 2-15 μm arasında olmaktadır. Bu bölge kızılötesi inceleme için uygundur. Zira, 290 K sıcaklıkta $\lambda_{\max} = 10\text{-}12 \mu\text{m}$ değerine eşit olmaktadır [29].

2.1.3.4. Stefan Boltzman Yasası

Bütün cisimler sıcaklıklarına ve yayınım katsayısına bağlı olarak değişik dalga boylarında termal radyasyon yaymaktadırlar. Siyah cisim, üzerine gelen bütün radyasyonu emen, mükemmel yansıtıcı ise üzerine gelen bütün radyasyonu yansıtan cisim olarak ifade edilmektedir. Bu ifadenin matematiksel ifadesi Stefan Boltzman yasası ile verilmektedir ve alanı A olan bir cismin yaydığı enerji miktarı bulunmaktadır. Stefan-Boltzman Yasası;

$$W(T) = \int_0^{\infty} W(\lambda, T) d\lambda \quad (1.5)$$

formülünden hesaplanarak;

$$W = \sigma \varepsilon T^4 \quad (\text{Watts/m}^2) \quad (1.6)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada;

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

ε = Cismin yayıcılığı (0 ile 1 arasında),

T= Sıcaklık (K)'dir.

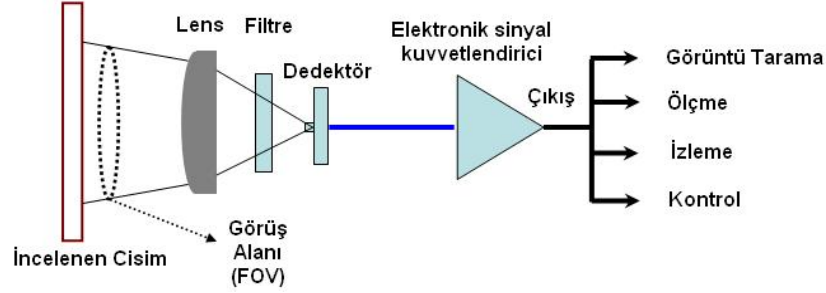
Siyah cisim için yayıcılık katsayısı 1 ($\varepsilon = 1$) olduğundan; yayınlanan maksimum radyasyon, teorik olarak siyah cisim tarafından yayınlanır.

2.1.4. Kızılötesi Kamera

Kızılötesi kameralar, cisimlerden yayılan ve insan gözü tarafından algılanamayan kızılötesi enerjiden elde edilen bilginin görünür hale dönüştürülmesini sağlarlar. Nesnelerin sahip oldukları sıcaklık dağılımları farklı renk tonlarıyla kızılötesi kameralar ile elde edilir. Diğer bir ifade ile kızılötesi kameralar kızılötesi enerjiyi ölçerler ve Planck formülü esas alınarak uygun ayarlama ile cisimlerin sıcaklık dağılımlarını elde etmemizi sağlarlar.

Kızılötesi kameranın genel blok yapısı Şekil 2.7'de verilmiştir. Sistemin girişi optik akı, çıkışı ise görüntüdür. Kızılötesi kameranın ilk elemanı ortamdaki gelen optik akıyı toplayan optik kısımdır. Lens, optik sistemden gelen akıyı sezimci (dedektör) üzerine düşürür. Lens ve sezimci arasında ise filtre bulunur. Filtre, çalışma yapılan bant aralığındaki sinyalleri geçiren yapıdır ve istenmeyen sinyallerin sisteme girişini engeller. Sezimci, optik sinyali elektriksiz sinyale çevirir. Sezimci sistemi, tek bir sezimci olabileceği gibi bir lineer diziden veya dik bakan bir matristen oluşabilir. Tek sezimcili sistemlerde ise tarama yatay ve dikey olmak üzere iki boyutta yapılır. Lineer dizi ise bir veya birkaç kolon sezimci yapısından oluşur. Lineer dizide tarama tek boyutta yapılır. Matris ise iki boyutlu bir sezimci dizidir. Kızılötesi kameraların temelini sezimciler teşkil eder.

Elektronik kısım ise kuvvetlendiriciler, sayısal filtreler ve sinyal işleme devrelerinden oluşur. Elektronik sistem sayesinde hedef arka plandan ayıklanır. Daha sonra ekranda görüntülenir. Hedef izleyiciler gibi bazı sistemlerde elektriksel işaret, otomatik hedef izleme sistemine verilir.

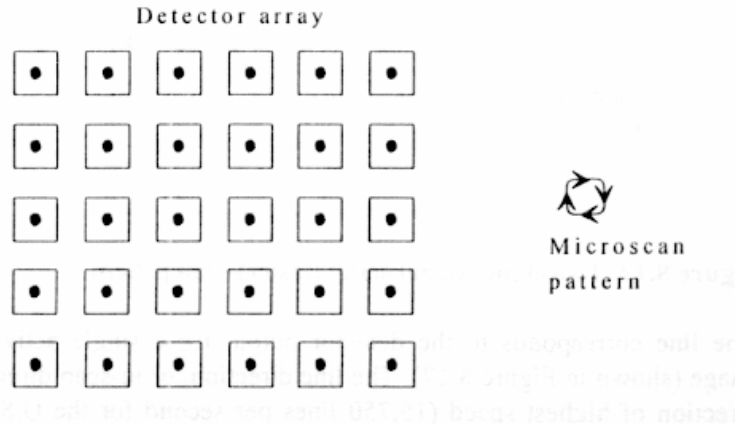


Şekil 2.7. Kızılötesi kameranın genel blok yapısı

Tek elemanlı ilk sezimciler, II. Dünya Savaşı sırasında Almanlar tarafından geliştirilmiştir. Daha sonraki yıllarda bu alanda yapılan çalışmalara hız verilmiş ve kızılötesi teknolojisi hızlı bir şekilde gelişmiştir. Günümüzde matris şeklinde tasarlanmaktadır. Kızılötesi sezimciler ilk olarak askeri amaçlar için geliştirilmişlerdir. Daha sonraki yıllarda kan ve protein analizinde, astrofizikte, haberleşmede kullanılmıştır.

İlk FLIR sistemler 1960'lı yıllarda tasarlanmıştır. 1970'li ve 1980'li yıllarda yapılan çalışmalar ile sistemin performansı geliştirilmiş ve ilk jenerasyon FLIR olarak adlandırılmıştır. Bu algılayıcılar (sensörler) HgCdTe (Civa Kadmiyum Tellürid) sezimci dizisinden oluşuyorlardı. Dizide 60, 120 veya 180 dedektör vardı. Bu dedektörlerin kuantum etkinliği oldukça düşüktü. Tek bantta çalışıyorlardı (8µm - 12µm) ve tarama gerekiyordu. 1980 ve 1990'lı yıllarda sezimci üretim teknolojisindeki gelişmeler ile ikinci nesil FLIR'lar üretilmiştir. Bu sistemler 480 adet yatay dedektör dizisinden ve birkaç kolondan oluşuyorlardı. Hissedicilikleri ve çözünürlükleri ilk nesil FLIR'lara göre daha iyiydi. 1990'lı yıllardan sonra, üçüncü nesil FLIR'lar gündeme geldi ve günümüzde hale üzerlerinde çalışılmaktadır. Üçüncü nesil FLIR'lar matris sezimcilerden oluşurlar. Matris sezimci yapısı Şekil 2.8'de

görülmektedir [29]. MWIR (orta kızılötesi) ve LWIR (uzak kızılötesi) bantlarında çalışabilirler. Günümüzde tek bantlı sistemler değil çok bantlı sistemler daha çok kullanılmaktadır [38- 40].



Şekil 2.8. Matris sezimci dizin yapısı [38]

2.1.5. Termal Görüntüleme

Cisimlerden yayılan ve insan gözü tarafından algılanamayan kızılötesi enerjiden elde edilen bilginin görünür hale dönüştürülmesi termal görüntüleme teknolojisi tarafından sağlanır. Böyle bir görüntüde nesnelerin sahip oldukları farklı sıcaklıklar farklı renk tonlarında (genellikle siyah-beyaz veya yeşil tonlarında) gösterilir (Şekil 2.9). Termal görüntüleme sistemleri nesnelere kızılötesi bant içinde yayılan ve insan gözünün göremediği bantlardaki (8-15 μm) radyasyonu (elektromanyetik enerjiyi) görüntüye dönüştürdüğü için pasif algılama yapan sistemler olarak tanımlanır.



Şekil 2.9. Termal görüntüleme [7]

Termal Görüntüleme Sistemleri görünür ışık bandında çalışan kameralardan farklı olarak gündüz veya gece yüksek netlik ve çözünürlükte görüntü elde ederler. Esasen Termal Görüntü Sistemleri (kızılötesi kameralar), ışığın yani güneşin olmadığı şartlarda çevre görüşü sağlamak amacıyla geliştirilmiş görüntü sistemleridir. Özellikle gece karanlık şartlarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Ayrıca görünür ışık bandı içinde etkin olan toz, kuru duman ve karanlık gibi faktörlerden hiçbir şekilde etkilenmeyen termal sistemler için en büyük engeli su buharı ve karbondioksit teşkil eder. Sistemi kısıtlayan en önemli etken su buharı, elektromanyetik enerjiyi soğurarak kayıplara yol açar. Böylece yeterli seviyede cisimlerin özelliklerini yansıtacak enerjinin sisteme ulaşması engellendiğinden perdeleme oluşur ve görüntü kalitesi düşer. Kısaca atmosferdeki meteorolojik olaylar termal görüntü sistemlerinin çalışmasını önemli derecede etkilemektedir. Her türlü yağış, bulut, sis, nem oranı ve rüzgar şiddeti, cisimlerin yayınladıkları kızılötesi enerji miktarını azaltarak kızılötesi görüş sistemini olumsuz olarak etkilemektedir [41]. Çeşitli termal görüntüleme sistemleri Şekil 2.10’da görülmektedir.



Şekil 2.10. Çeşitli termal görüntüleme sistemleri

Görüntü kalitesindeki düşüşe neden olan diğer bir etken de cisimlerin hepsinin veya çoğunun aynı enerji seviyesinde yayılım yapacak ısıya ulaşmalarıdır. Bu durumda soğuk ve sıcak kavramı yok olur. Cisimlerin birbirine olan farklılıklarının azalmasına hatta yok olmasına neden olur. Belirtilen şartlar en fazla günbatımı sonrası ve gün doğumu öncesinde oluşur. En iyi ısı farkının olduğu zaman ise gece yarısıdır. Gece arka plan görüntüsü azalınca cisimler daha net görülür. Çeşitli termal kamera görüntüleri Şekil 2.11’de görülmektedir.



Şekil 2.11. Çeşitli termal görüntüler [41]

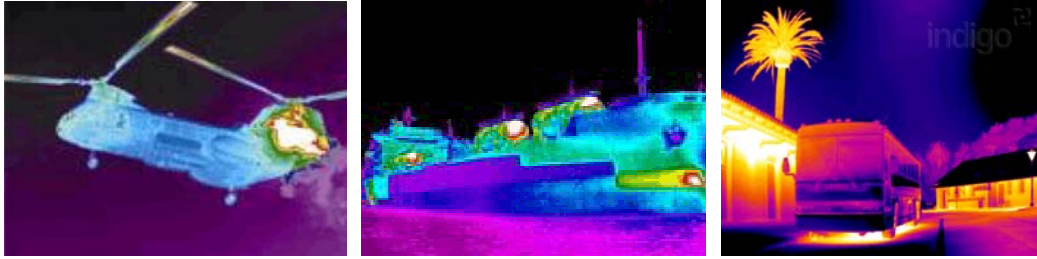
2.1.5.1. Termal Görüntüleme Kullanım Alanları

Kullanım alanları ve etkinlikleri hızla artan elektro-optik ürünler, teknolojik gelişime paralel olarak çoğunlukla askeri amaçla kullanılmakla birlikte sivil uygulamalarda da yaygınlaşmaktadır. Halen kritik teknoloji ürünü olarak değerlendirilen yüksek performanslı termal görüntüleme sistemleri az sayıda ülkede tasarlanıp üretilmektedir [42]. Termal görüntüleme sistemlerinin temel kullanım alanları ise şunlardır;

Askeri Uygulamalar: Modern orduların pasif algılama sistemlerine duyduğu ihtiyacın karşılanması amacıyla elektro-optik alanında yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları yaklaşık otuz yılı aşkın süredir devam etmektedir. Bu karmaşık teknolojinin gelişimine yol açan ana fikir; görünmeden görmektir. Termal görüntüleme sistemleri sahrada bu görevi yerine getiren en etkin elektro-optik ürünler olarak kabul edilirler. Bu ürünler pasif algılama yoluyla fark edilmeden tehdit unsurlarını tespit eder ve görevin başarılmasına katkıda bulunurlar [43, 44].
Termal Görüntüleme Sistemleri;

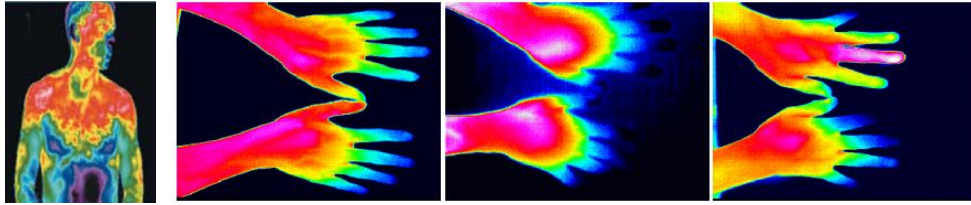
- Hedef tanıma,
- Sınır gözetlemeleri,
- Karargah, askerî tesis ve karakolların korunması,
- Kıyı, liman gözetlemeleri,
- Petrol platformu, boru hattı ve baraj gibi sivil tesislerin korunması

gibi kritik askeri görev alanlarında kullanılmaktadır. Askeri uygulamalardan alınan çeşitli termal görüntüler Şekil 2.12’de görülmektedir.



Şekil 2.12. Askeri uygulamalardan alınan çeşitli termal görüntüler [44]

Tıp Uygulamaları: 0 K üzerinde sıcaklığa sahip her cisim ışınım yaptığından insan vücudu da (ortalama sıcaklığı 310 K) kızılötesi radyasyon yayar. Diğer bir ifade ile güneş gibi insan da bir elektromanyetik dalga yayıcıdır. İnsan vücudu, besinleri yakmakla oluşan ısıyı, kendi sıcaklığını 310 K de tutabilmek için kızılötesi radyasyon yayarak etrafa verir. Vücut sıcaklık dağılım haritası bu ısı (kızılötesi) ışınlarının saptanması ile yapılır. Başta meme kanseri (breast cancer) olmak üzere birçok hastalığın saptanmasında termal görüntüleme kullanılır [45]. Şekil 2.13’te çeşitli termal medikal görüntüler yer almaktadır.



Şekil 2.13. Medikal uygulamalardan alınan çeşitli termal görüntüler [45]

Endüstriyel Uygulamalar: Termal görüntüleme tekniği ile işletmelerde elektrik panolarından şalt sahalarına, kompresörlerden enjeksiyon kalıplarına, havai hatlardan dağıtım hatlarına, fırınlardan bacalara sıcaklık dağılımının fotoğrafları çekilerek kontak yangınları, enerji kayıpları ve arızalar engellenebilmektedir. Elektrik pano,

şebeke ve şaltları kolayca denetleyebilecek arıza, verimsizlik ve yangın kaynağı olabilecek ısınma noktaları bulunabilir. Bütün elektrik panolarındaki ısınma noktalarını yani gevşemiş veya özelliğini yitirmiş kontaklar ile aşırı akım çeken makinalar tespit edilebilir. Böylece yangın olasılığı azaltılır. Bunun yansira endüstriyel uygulamalarda termal görüntülerin kullanımı ile;

- Isısal izolasyon yapılmış bölümlerde izolasyon malzemelerdeki bölgesel zayıflıklar tespit edilir,
- Elektrik motorlarında yapılacak ölçümlerde motor yüzeyindeki ısınma dolayısıyla motor yükü hakkında bilgi edinilebilir,
- Üretim ve imalatla ilgili sorunlar belirlenebilir.

Şekil 2.14'te endüstriyel uygulamalardan alınan çeşitli termal görüntüler görülmektedir.



Şekil 2.14. Endüstriyel uygulamalardan alınan çeşitli termal görüntüler [38]

2.3. Kızılötesi Termografi ile Tahribatsız Muayene

Malzemenin kızılötesi bantta oluşturduğu sıcaklık profilinin değerlendirilerek düzensizlik ve kusurların algılanmaya çalışıldığı bir muayene yöntemi olarak tanımlanan kızılötesi termografide, malzemenin termal özellikleri incelenerek yüzeydeki ve yüzeyin altındaki anormallikler, hasarlar, üretim hataları, çatlaklar vb. tespit edilir [3]. Bir tahribatsız muayene türü olarak kızılötesi termografinin başlıca kullanım alanları aşağıdaki gibidir:

- Boşlukların, eklerdeki ayrılmaların, hasar görmüş ve kırılmış yapı bileşenlerinin muayenesi,
- Çatlakların tespiti,
- Katmanlı parçalardaki yabancı cisimlerin ya da tabakaların tespiti,
- Kompozit katmanlı yapılardaki üretim sırasında oluşan katmanlar arasındaki istenmeyen sıvı kirlenmesinin tespiti,
- Metalik katmanlı parçalar üzerindeki aşınmanın (corrosion) tespiti,
- Çarpma darbelerinin ve nemin verdiği hasarların tespiti,
- Elektrik ve hidrolik sistemlerdeki aşırı ısınmaların tespiti,
- Uzak ve havacılık endüstrisinde kompozit malzemelerin testi,
- Metal endüstrisi ve inşaat sektörü ile ilgili testler.

Kızılötesi termografiyi diğer tahribatsız muayene yöntemlerinden üstün kılan avantajları aşağıdaki gibidir [11]:

- İşlemlerin diğer muayene tekniklerine göre hızlı olması,
- Temassız olması,
- Malzeme iç yapısında herhangi bir değişikliğe sebebiyet vermemesi,
- Kızılötesi ışınlar iyonlaştırıcı özelliğe sahip olmadığından hem malzeme hem de canlı açısından radyasyon- güvenlik sorunu oluşturmamaktadır,
- Sonuçların kolaylıkla ilgili formatlara dönüştürülmesi (resim formatı),
- Uygulamaların yaygın olması.

Kızılötesi termografi yönteminin tahribatsız muayene yöntemi olarak kullanılmasında karşılaşılan bir takım zorluklar dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunlar ise aşağıda listelenmiştir [12-15]:

- Termal kayıpların termal görüntülerdeki netliğe etki etmesi,
- Kızılötesi kameraların fiyatlarının yüksek olması,
- Sadece yüzeyin ve yüzeyin alt kısmının incelenebilmesi,
- İncelenecek materyallerin inceliği ile ilgili sınır olması,
- Test edilecek cisimlerin düşük yayıcılığa sahip olması (Emissivity, ϵ).

2.3.1. Kızılötesi Termografi ile Tahribatsız Muayene Türleri

Kızılötesi Termografi, tahribatsız muayenede harici bir ısı kaynağının (heat source) kullanılıp/kullanılmamasına göre ikiye ayrılır. Sistemde, tahribatsız muayeneyi gerçekleştirmek için harici bir ısı kaynağı kullanılıyorsa aktif termografi, kullanılmıyorsa pasif termografi adı verilir [4].

Pasif Termografi: Kızılötesi termografi ile tahribatsız muayenenin pasif türü; binalar, endüstriyel uygulamalar, bakım işlemleri, tıp uygulamaları ve özellik testleri başta olmak üzere birçok uygulamada kullanılmaktadır [46]. Bu test uygulamalarında, anormal sıcaklık profilleri hatalar ile ilişkili potansiyel problemleri gösterir. Pasif termografide anahtar kelimeler uygulamaya göre sıcaklık farkı veya sıcak nokta (hot spot)'tur. Test işleminde 1-2 °C lik sıcaklık farkı genel olarak şüpheli olsada 4 °C lik sıcaklık fark değeri anormal davranış veya durum için güçlü bir kanıt olarak değerlendirilir.

Aktif Termografi: Aktif termografi sisteminde, tahribatsız muayeneyi gerçekleştirmek için harici bir ısı kaynağı kullanılır [47-51]. Diğer bir ifade ile aktif termografide test edilecek cisim ısıtılır ve zamanla azalan sıcaklık eğrisi kaydedilir. İşlem kısaca şu şekildedir; Yüzeyde yutulan ısının yüzeyin altına doğru iletim, taşınım ve ışınım yoluyla geçişi sonucunda, ilk ısıl darbeden sonra cismin sıcaklığı hızlı bir şekilde değişir. Cisimde bir hatanın bulunması ısı iletimini etkiler. Bu yüzden yüzey sıcaklığındaki değişim izlendiğinde, yüzeyden uygulanan sıcaklık hatalara ulaştığı zaman farklı sıcaklık değerleri gözlemlenir. Bununla birlikte yüzeyden daha uzakta, derinde bulunan hatalar daha sonra gözlemlenir. Ayrıca yüzeyden daha uzakta, derinlerde netlik azalır. Bu durum ısıl netlik kaybı olarak bilinir.

Aktif termografi için kullanılacak alternatif ısı kaynakları aşağıdaki gibidir [3]:

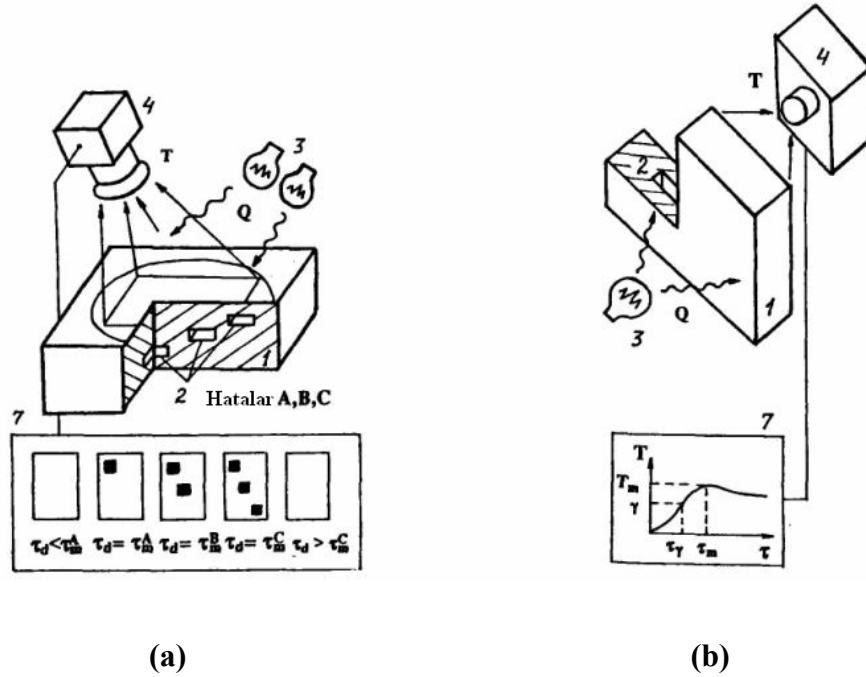
- Yüksek güce sahip sinematografik lambalar,
- Kızılötesi lambalar,
- Yüksek güce sahip fotografik flaşlar,

- Lazer ışını,
- Ateş tabancası / flaş tabanca,
- Ampul (bulb) ısıtıcı,
- Filament ısıtıcı,
- Mikrodalga.

Şekil 2.15'te görüldüğü gibi aktif termografide ısıtıcılar iki farklı türde yerleştirilebilir [4];

Tek Taraflı (One-sided/reflective): Isıl kaynak ve ısı algılayıcı dedektör (kızılötesi kamera), muayene edilen nesnenin aynı tarafına yerleştirilir.

Çift Taraflı (Two-sided/transmissive): Isıl kaynak ve ısı algılayıcı dedektör (kızılötesi kamera), muayene edilen nesnenin her bir tarafına yerleştirilir. İnce numuneler için çift taraflı yöntem daha iyi sonuçlar verir.



Şekil 2.15. Aktif termografide ısıtıcıların yerleştirilme türleri [11]

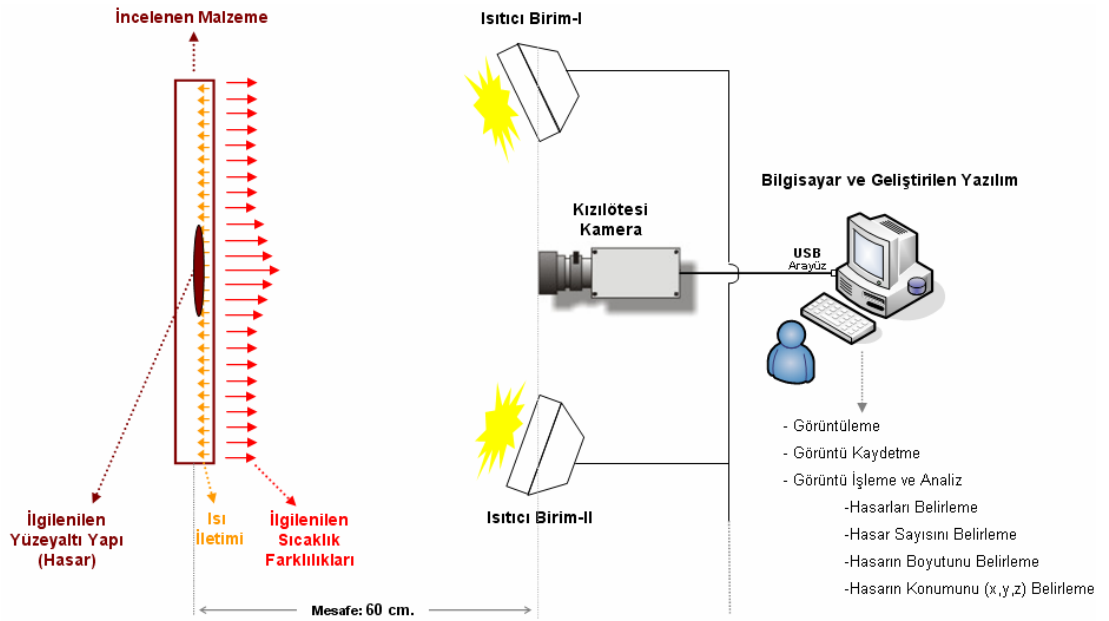
a) Tek taraflı, b) Çift taraflı

3. MATERYAL VE YÖNTEM

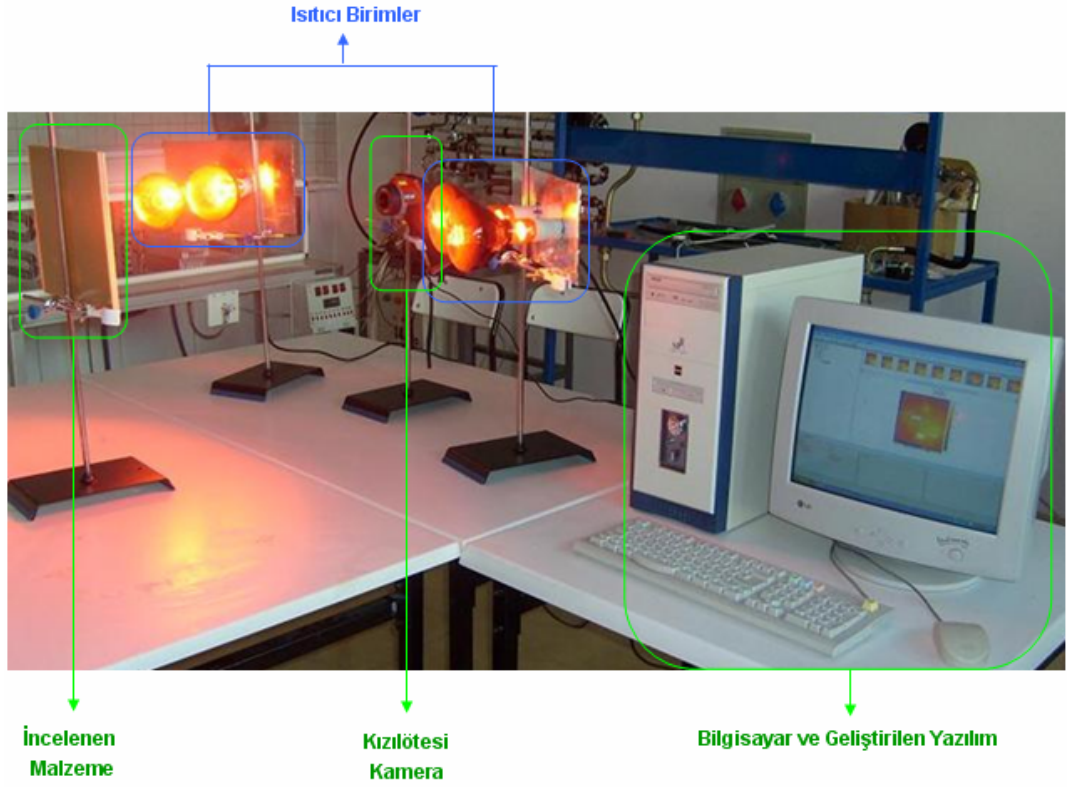
3.1. Test Sisteminin Genel Yapısı ve Bileşenleri

Bu çalışmada tahribatsız muayene işlemi gerçekleştirmek için kurulan aktif kızılötesi termografi sisteminin blok yapısı Şekil 3.1’de görülmektedir. Kurulan kızılötesi termografi sisteminin genel görünümü ise Şekil 3.2’de görülmektedir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de görüldüğü gibi tahribatsız muayene işlemi gerçekleştirmek için kullanılan kızılötesi termografi sisteminin temel bileşenleri şunlardır:

- Kızılötesi kamera
- Isı Kaynağı (Isıtıcı birim)
- Bilgisayar ve geliştirilen yazılım
- Parça tutucu (İncelenen cisim için)
- Tripod (Kamera için)



Şekil 3.1. Kızılötesi termografi sisteminin blok yapısı



Şekil 3.2. Kızılötesi termografi sisteminin genel görünümü

3.1.1. Kızılötesi Kamera

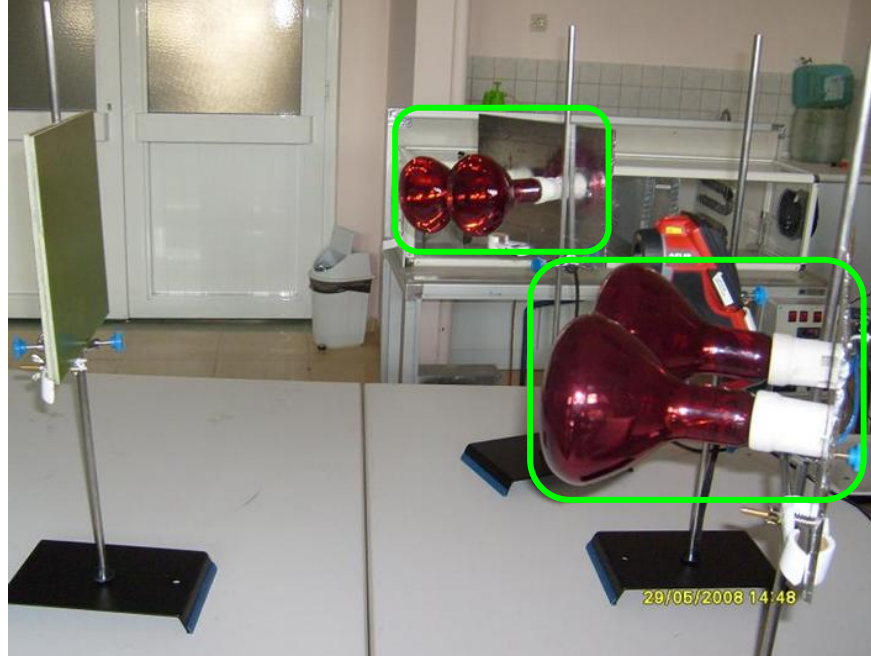
Bu tez çalışmasında kızılötesi görüntüleri almak için FLIR Systems firmasının en son ürünlerinden olan FLIR i50 kızılötesi kamera kullanılmıştır. Kamera 7.5 ile 13 μm dalga boyu aralığında (spektral aralıkta) çalışmaktadır. Kamera 140x140 dedektör dizini yapısına sahiptir ve 240x240 piksel boyutunda görüntüler sağlamaktadır. Şekil 3.3'te görülen kızılötesi kameranın teknik bilgileri EK-1 'de verilmiştir [52].



Şekil 3.3. Flir i50 kızılötesi kamera [52]

3.1.2. Isı Kaynağı

Geliştirilen sistemde, ısı kaynağı olarak kızılötesi lambalar kullanılmıştır. 250 W ve 375 W lık 4 adet kızılötesi lamba, testlerde Şekil 3.4'deki gibi kızılötesi kamera ile birlikte muayene edilen numunenin aynı tarafına yerleştirilerek ısıtma gerçekleştirilmiştir. 250 W lık lambaların kullanıldığı testlerde 1 kW (4x250 W), 375W lık lambaların kullanıldığı testlerde 1.5 kW (4x375 W) ile ısıtma yapılmıştır.



Şekil 3.4. Isı kaynaklarının sistemde görünümü

3.1.3. Bilgisayar ve Geliştirilen Yazılım

Geliştirilen sistemde, kızılötesi kamera sistemin bir bileşeni olan bilgisayara doğrudan, USB arayüz kullanılarak bağlanmıştır. Bu bilgisayar üzerinde geliştirilen yazılım çalışmaktadır. Tez çalışmasında, kızılötesi kameradan elde edilen kızılötesi görüntülerin ve kızılötesi görüntülerden elde edilen sıcaklık dağılımının görüntü analizleri yapılarak malzemenin iç yapısında herhangi bir hasarın olup olmadığını, hasar var ise kaç tane hasar olduğunu, hasarın boyutunu ve yerini (malzemedeki konumunu ve ölçüm yapılan yüzeye olan uzaklığını/derinliğini) tespit eden bir

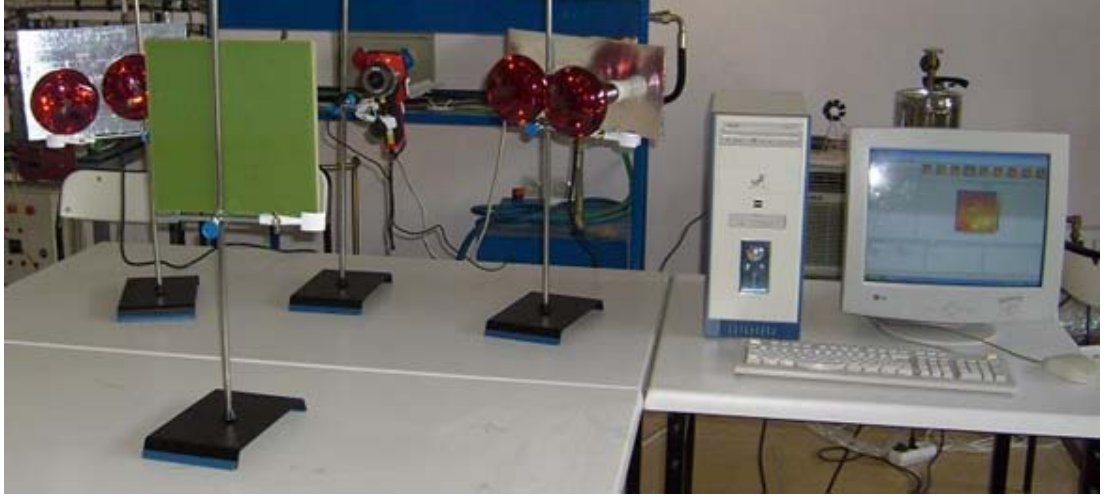
bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir. Görüntü işleme teknikleri kullanılarak geliştirilen yazılım ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 3.4'te verilecektir.

3.2. Test İşlemleri

Kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene işlemi gerçekleştirmek için laboratuarda test düzeneği oluşturulmuş ve testler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5). Test işlemlerinde;

- Farklı numuneler kullanılmıştır. Bu numuneler aşağıda listelenmiştir:
 - Karbon elyaf takviyeli plastik (Carbon Fiber Reinforced Plastic- CFRP) kompozit,
 - Cam elyaf takviyeli plastik (Glass Fiber Reinforced Plastic- GFRP) kompozit,
 - E-cam elyaf takviyeli polyester (E-Glass Fiber Reinforced Polyester- GFRP) kompozit,
 - Epoksi.
- Farklı değerlerde ısı kaynakları kullanılmıştır (1 kW, 1,5 kW).
- Isı kaynaklarının ve kızılötesi kameranın test edilen malzemeye olan uzaklığı değiştirilerek testler tekrarlanmıştır (40, 50, 70, 80 ve 100 cm).
- Isı kaynaklarının konumları değiştirilerek testler tekrarlanmıştır.
- Farklı şekil ve boyutta hasarlar incelenmiştir (Dairesel, dikdörtgensel, çizgisel vb. şekillerdeki hasarlar).
- Kızılötesi kamera için farklı sıcaklık ölçüm aralıklarında testler yapılmıştır.

Tez çalışması boyunca 250 den fazla test yapılmıştır ve 10000 civarında test görüntüsü alınmıştır.



Şekil 3.5. Kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene işlemi test düzeneği

3.2.1. Testlerde Kullanılan Numuneler

Bu tez çalışmasında sunulan yeni yaklaşımı, bu yaklaşım doğrultusunda geliştirilen yazılımı ve laboratuara kurulan test düzeneğini test etmek amacıyla TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) Malzeme Enstitüsü'nden ve özel bir firmadan (Plast-Form Kimya San. ve Tic. Ltd. Şti.);

- Karbon elyaf takviyeli plastik (Carbon Fiber Reinforced Plastic- CFRP) kompozit,
- Cam elyaf takviyeli plastik (Glass Fiber Reinforced Plastic- GFRP) kompozit,
- E-cam elyaf takviyeli polyester (E-Glass Fiber Reinforced Polyester- GFRP) kompozit,
- Epoksi

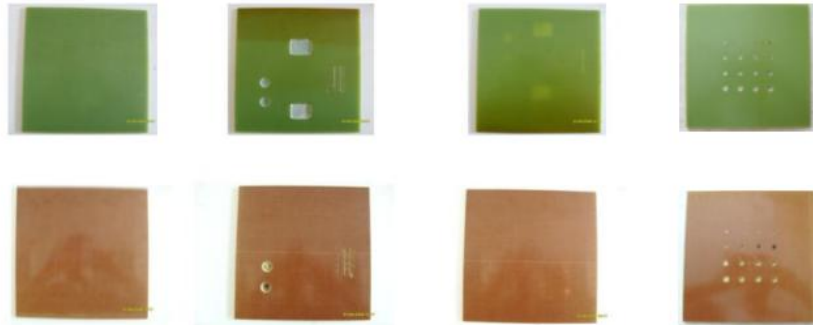
levhalar (Şekil 3.6) tedarik edilmiştir. Levhalar 25x25 cm boyutlarında ve farklı kalınlıklardadırlar (3, 5, 6, 10 ve 12,5 mm). Bu levhalara farklı derinlik ve boyutlarda hasarlar (dairesel, dikdörtgensel, çizgisel vb.) oluşturulmuştur. Oluşturulan hasarlardan görünüm Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.6. Testlerde kullanılan levha şeklindeki malzemeler

3.3. Testin Yöntemi

Kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene işlemi yapılan uygulamada test işleminin yöntemi kısaca şu şekildedir: $t=0$ anında ısıtıcı lambalar yakılır, hasarlı malzeme ısıtılmaya başlanır ve kızılötesi kamerada bu andan itibaren görüntü almaya başlar. Isıtma işlemi belirlenen süre boyunca devam eder. Bu arada da kızılötesi kamera görüntü almaya devam etmektedir. Belirlenen süre tamamlanınca da hem ısıtıcılar hem de kızılötesi kamera kapatılır. Kızılötesi kameranın kaydettiği görüntüler sayısal ortama (bilgisayar) aktarılarak yüzey sıcaklık değişimleri incelenir. Malzemedeki iç hasar, yüzey sıcaklık değişimini etkilediğinden dolayı termografik görüntüler analiz edildiğinde hasar hakkında bilgi edinilir. Hasarın boyutu ve derinliği yapılan analizler sonucu ortaya çıkar.

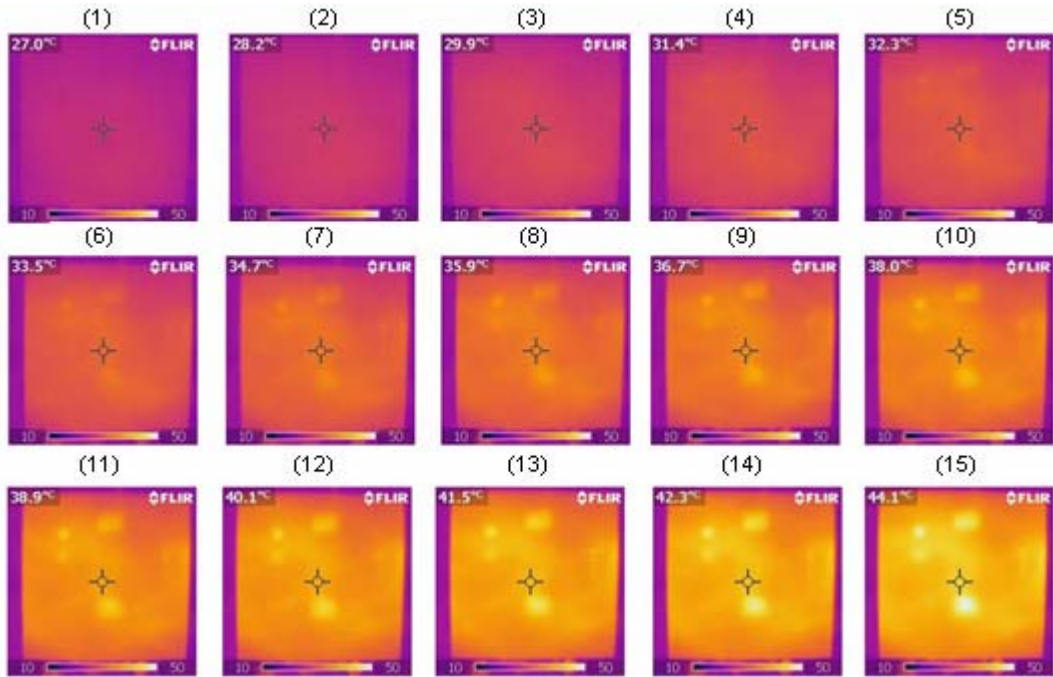


Şekil 3.7. Oluşturulan örnek hasarların görünüşleri

3.3.1. Örnek Testler

3.3.1.1. Örnek Test 1

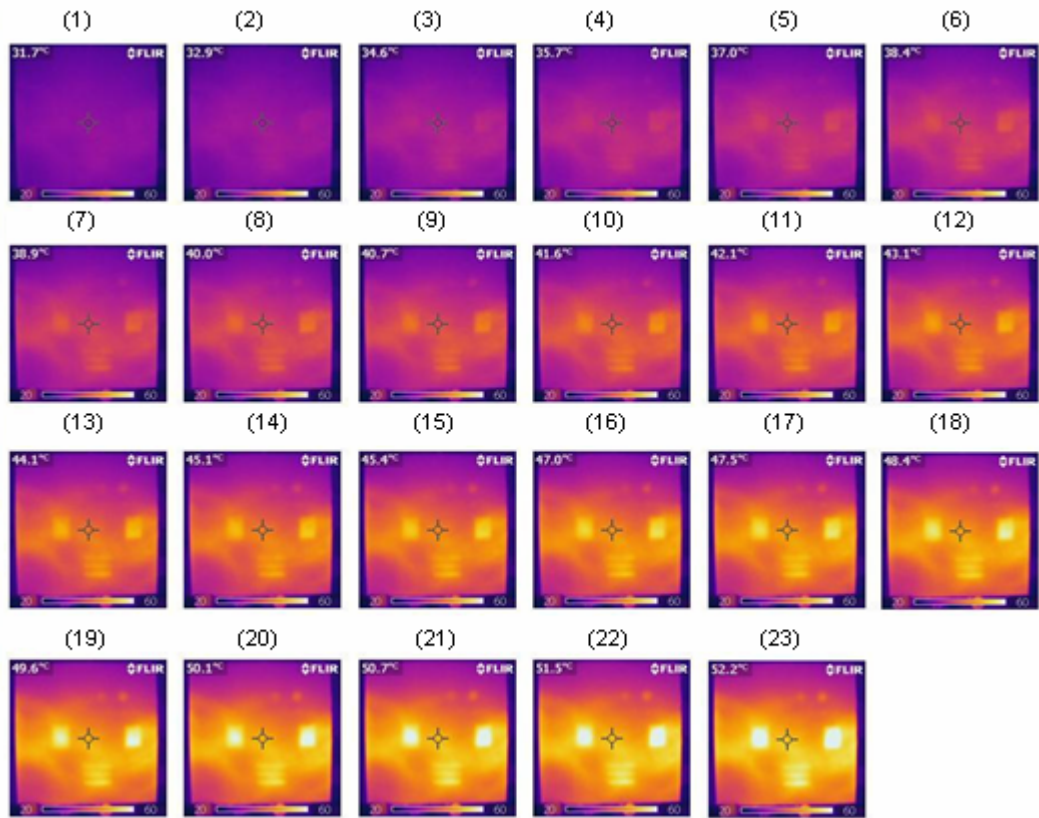
Yapılan örnek Test 1’de 5x250x250 mm epoksi levhanın ısıtılması ile elde edilen kızılötesi görüntüler Şekil 3.8’de görülmektedir. Test başlangıç sıcaklığı 27 °C olarak alınmıştır. Testte toplam 1 kW kapasiteye sahip ısıtıcılar kullanılmıştır. Isıtıcılar ile numune arasındaki mesafe 60 cm dir. Kızılötesi kamera ise numune ile arasındaki mesafe ise 60 cm olacak şekilde yerleştirilmiştir. Kızılötesi kameranın sıcaklık ölçüm aralığı 10°C – 50°C olarak sabit tutulmuştur. 103 saniye boyunca ısıtılan cisimden alınan örnek görüntüler Şekil 3.8’te görülmektedir. Bu testte aynı şekle sahip hasarlardan ölçüm yapılan yüzeye daha yakın olanların daha net bir şekilde kızılötesi kamera tarafından tespit edildiği açıkça görülmektedir.



Şekil 3.8. Isıtılan epoksi levhadan elde edilen termal görüntüler

3.3.1.2. Örnek Test 2

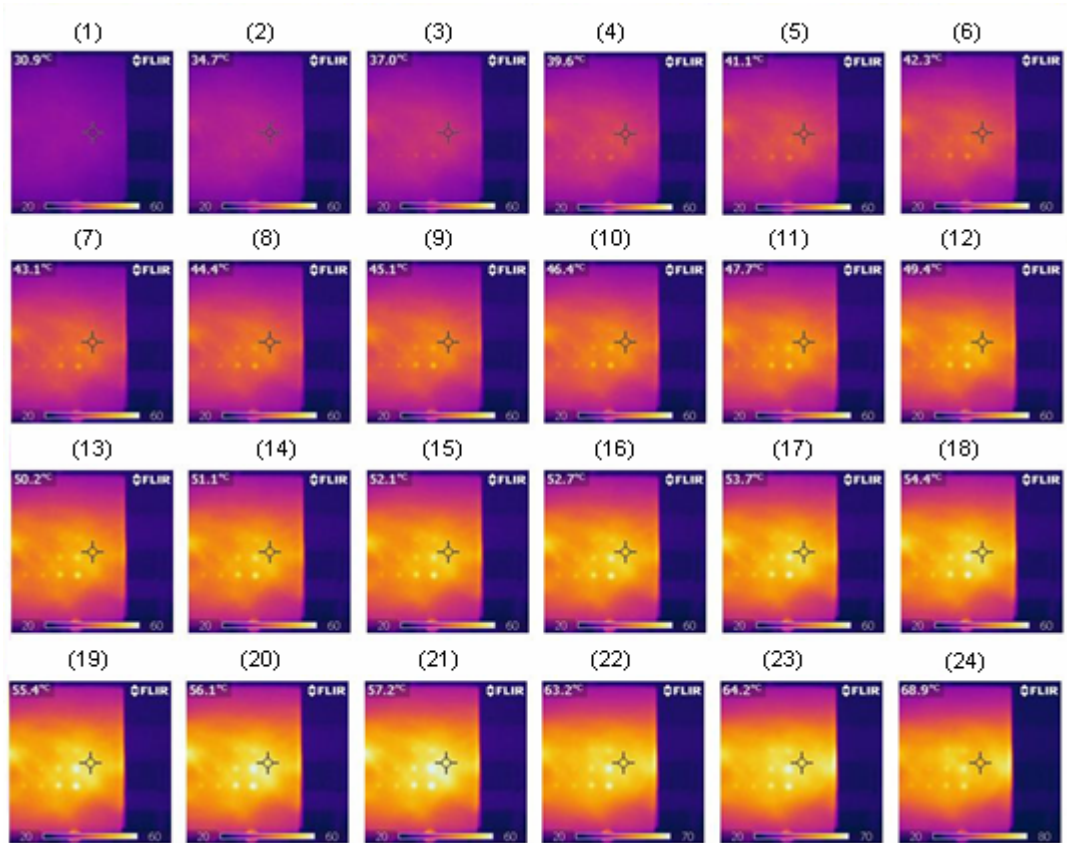
Yapılan örnek Test 2’de 5x250x250 mm epoksi levhanın ısıtılması ile elde edilen kızılötesi görüntüler Şekil 3.9’da görülmektedir. Test başlangıç sıcaklığı 30,2 °C olarak alınmıştır. Testte toplam 1,5 kW kapasiteye sahip ısıtıcılar kullanılmıştır. Isıtıcılar ile numune arasındaki mesafe 60 cm dir. Kızılötesi kamera ise numune ile arasındaki mesafe ise 60 cm olacak şekilde yerleştirilmiştir. Kızılötesi kameranın sıcaklık ölçüm aralığı 20°C – 60°C olarak sabit tutulmuştur. 75 saniye boyunca ısıtılan cisimden alınan örnek görüntüler Şekil 3.9’da görülmektedir. Bu testte çizgisel hasarlar üzerinde durulmuştur. 3x50 mm boyutlarındaki 2,5 mm ve 2 mm derinlikteki iki çizgisel hasar ile 5x50 mm boyutundaki 2 mm derinlikteki hasarlar net bir şekilde kızılötesi kamera tarafından görüntülenmiştir.



Şekil 3.9. Isıtılan epoksi levhadan elde edilen termal görüntüler

3.3.1.3. Örnek Test 3

Yapılan örnek Test 3’de üzerinde farklı boyut ve derinlikte dairesel hasarlar bulunan 5x250x250 mm boyutlarındaki karbon elyaf takviyeli plastik (carbon fiber reinforced plastic- CFRP) kompozit levha kullanılmıştır. Test başlangıç sıcaklığı 30,9°C dir. Testte toplam 1 kW kapasiteye sahip ısıtıcılar kullanılmıştır. Isıtıcılar ile numune arasındaki mesafe 60 cm dir. Kızılötesi kamera ise numune ile arasındaki mesafe ise 60 cm olacak şekilde yerleştirilmiştir. Testin ilk aşamasında kızılötesi kameranın sıcaklık ölçüm aralığı 20°C – 60°C olarak sabit tutulmuştur. Daha sonra üst sıcaklık sınırı ilk önce 70 °C ye daha sonra 80 °C ye çıkarılarak teste devam edilmiştir. 90 saniye boyunca ısıtılan cisimden alınan örnek görüntüler Şekil 3.10’da görülmektedir. Bu testte farklı boyut ve derinlikte bulunan dairesel hasarlar tespit edilmeye çalışılmıştır.



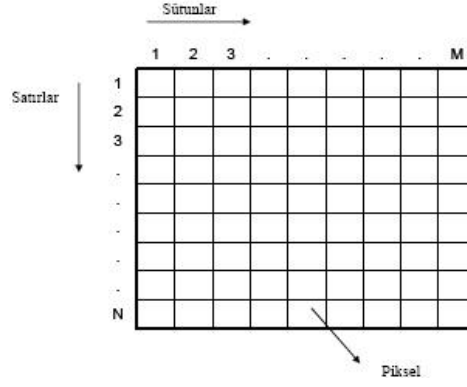
Şekil 3.10. Isıtılan kompozit levhadan elde edilen termal görüntüler

3.4. Yazılım Geliştirilmesi

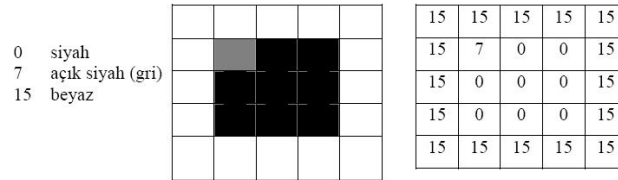
3.4.1. Sayısal Görüntülerin Analizi

Bilgisayarla görme, görüntü veya görüntü setleri üzerinden bilgilerin teorik ve algoritmik olarak bilgisayar tarafından çıkarılıp incelenmesini sağlayan bir bilimdir [42]. Bilgisayarla görme işlemini gerçekleştirebilmek için görüntünün sayısallaştırılması gerekir. Görüntünün sayısallaştırılması kameralar aracılığı ile gerçekleştirilir. Bu çalışmada Bölüm 3.1.1’de özellikleri belirtilen kızılötesi kamera kullanılmıştır. Kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene işleminde, malzemenin yüzeyinden alınan kızılötesi görüntüler bu kızılötesi kamera vasıtasıyla sayısallaştırılarak bilgisayar ortamına aktarılmış ve hasarları tespit etmek için gerekli çalışmalar bu görüntüler üzerinde yapılmıştır. Ancak görüntü sayısallaştırılarak bilgisayar ortamına aktarıldıktan sonra görüntüden istenilen bilgilerin elde edilebilmesi için bazı işlemlerden geçirilmesi gerekir [53-55]. Görüntü işleme, genel terim olarak resimsel bilgilerin manipulasyonu ve analizi demektir. Görüntü işleme ile sayısal görüntülerin analizini gerçekleştirebilmek için sayısal görüntüler ve sayısal görüntüyü oluşturan pikseller hakkında temel bilgileri edinmek faydalı olacaktır.

Bir sayısal görüntü, satır ve sütun indisleri görüntü içerisinde herhangi bir noktayı tanımlayan elemanlardan meydana gelmiş bir matris (N satır ve M sütun, satır ve sütun indeksleri y ve x) olarak göz önüne alınabilir. Bu matrisin her bir elemanının sayısal değeri, görüntüde kendisine karşılık gelen noktalardaki değere eşittir. Bu sayısal dizinin veya matrisin her bir elemanına görüntü elemanı, resim elemanı veya *piksel* denir (Şekil 3.11). En basit durumda pikseller 0 veya 1 değerini alırlar. Bu piksellerden oluşan resimlere ikili (binary) resim denir. 0 ve 1 değerleri sırasıyla karanlık ve aydınlık bölgeleri veya nesne ve zemini (nesnenin önünde veya üzerinde bulunduğu çevre zemini) temsil ederler. Sayısal görüntü dosyaları renkli olarak genellikle 24 bit; gri seviye görüntüler 1-2-4-6-8 bit olabilirler. Şekil 3.12. de örnek bir 4 bitlik gri seviye sayısal resim ve piksel değerleri görülmektedir [56,57].



Şekil 3.11. Sayısal resmin temel yapısı [56]



Şekil 3.12. Dört bitlik gri seviye sayısal resim ve piksel değerleri [56]

3.4.2. Hasarların Analizi

Kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene işleminde detaylı analizler yaparak malzemenin iç yapısında herhangi bir hasanın olup olmadığını, hasar var ise kaç tane hasar olduğunu ve hasarın yerini (ölçüm yapılan ön yüzeye olan uzaklığını/hasarın derinliğini) tespit eden bir yazılım geliştirilmiştir. Test görüntülerinin ve hasarların analizi ilgili çalışmalar aşağıdaki şekildedir.

3.4.2.1. Piksel Değerlerinin Analizi

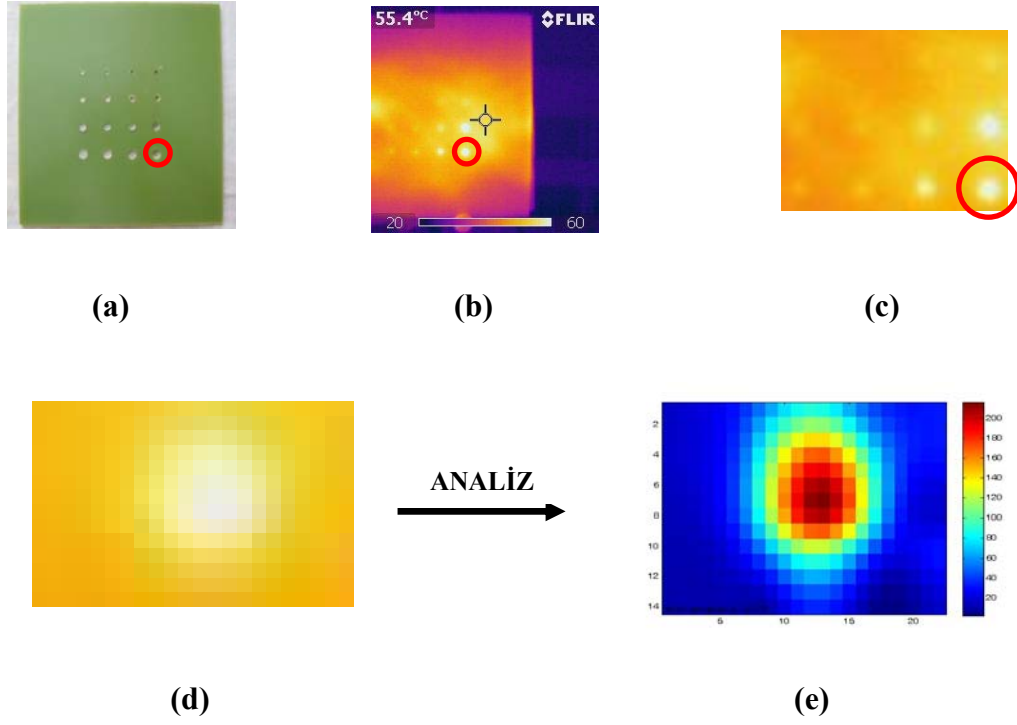
Isıtılan malzemenin kızılötesi termografi ile belirlenen yüzey sıcaklık dağılımı kullanılarak tahribatsız muayenesi işleminde elde edilen numune yüzey görüntülerindeki piksel değerlerinin analizi temel işlemdir. Numunenin iç yapısında

bulunan anormallikler, numune yüzey görüntülerindeki piksel değerlerinde farklılıklara neden olmaktadır. Piksel değerleri hasarların geometrileri ve boyutları hakkında bize bilgi vermektedir. Ayrıca test işlemi boyunca elde edilen görüntülerdeki piksellerin değerlerindeki değişim, hataların derinlikleri ve yine boyutları hakkında bilgi vermektedir.

Şekil 3.13'te üzerinde farklı boyut ve derinlikte dairesel hasarlar bulunan 5x250x250 mm epoksi levha kullanılarak yapılan bir testle ilgili görüntüler yer almaktadır. Test işlemine tabi tutulan malzeme Şekil 3.13.a'da görülmektedir. Tahribatsız muayene testinde kızılötesi kamera ile malzemenin sağlam yüzeyinden alınan test görüntülerinden bir tanesi Şekil 3.13.b'de görülmektedir. Şekil 3.13.c'de test görüntüsünden elde edilen ve hasarların bulunduğu bölgeyi kapsayan görüntü görülmektedir. Şekil 3.13.d'de ise bu hasarlardan bir tanesinin görüntüsü görülmektedir. Şekil 3.13.d'deki görüntü analiz edildiğinde Şekil 3.13.e'deki piksel yapı görünümü elde edilmiştir. Aynı hasar görüntüsünün piksel değerleri ise Şekil 3.13.f'deki gibidir.

Çalışma boyunca test işlemlerinde görüntüler 240x240 piksel değeri sabit tutularak elde edilmiştir ve testlerde kullanılan bütün görüntüler 240x240 piksel değerine sahiptir. Büyük piksel değerleri yazılımın daha başarılı çalışması için önemlidir. Ancak büyük piksel değerleri ile çalışıldığında işlem zamanı uzamakta dolayısıyla performans düşmektedir.

Ayrıca test işlemlerinde kullanılan numunelerin görüntü alınan yüzey boyutları 250x250 mm olarak sabit tutulmuştur. Buradan hasar boyutlarının ve hasarların yüzeye olan uzaklıklarının belirlenmesinde piksel sayısı ve yüzey boyutları arasında ilişki kurularak daha doğru sonuçların elde edilmesi amaçlanmaktadır.



16	17	19	23	25	26	31	41	52	63	72	79	77	69	60	49	41	35	30	30	31	34
16	18	19	21	23	27	36	51	67	79	89	98	102	95	79	63	47	39	35	33	31	33
16	18	19	22	24	28	38	57	79	101	116	131	137	127	108	84	62	47	40	34	31	35
17	18	19	22	25	29	41	65	93	122	145	165	171	162	140	108	80	56	42	35	30	35
17	18	19	22	25	30	43	70	102	135	162	186	195	186	165	130	96	63	44	32	28	30
16	17	17	21	25	30	45	76	109	148	176	201	212	206	185	146	105	66	42	29	21	25
15	15	16	19	24	30	46	78	114	153	185	212	225	221	200	155	111	67	38	24	18	20
13	14	14	18	23	29	45	72	110	156	190	220	232	228	204	158	111	63	34	21	13	14
12	13	13	17	22	29	43	58	96	140	173	198	207	199	177	138	95	54	32	22	16	19
13	14	13	13	15	19	28	51	71	99	123	141	144	134	119	83	58	35	26	27	30	33
13	13	12	12	14	18	25	32	46	65	82	95	96	88	74	53	36	23	19	24	31	38
11	12	11	11	12	16	21	22	31	47	62	73	75	68	57	38	25	13	10	15	23	29
10	11	10	10	11	13	16	14	21	33	45	55	56	52	42	26	13	4	3	9	15	23
10	11	11	10	10	12	10	2	5	16	26	33	35	31	26	14	4	0	0	4	11	18

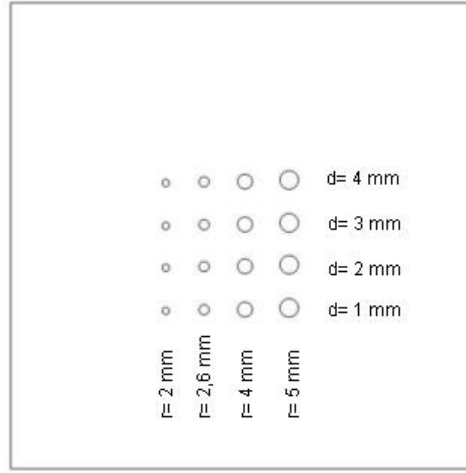
(f)

Şekil 3.13. Test görüntüsünde piksel değerlerinin incelenmesi

a) Test işlemine tabi tutulan malzeme, **b)** Kızılötesi kamera ile alınan bir test görüntüsü, **c)** Test görüntüsünde hasarların bulunduğu bölge, **d)** Hasarlardan bir tanesinin görüntüsü, **e)** Analiz sonucunda piksel yapı görünümü, **f)** Piksel değerlerinin görüntüsü

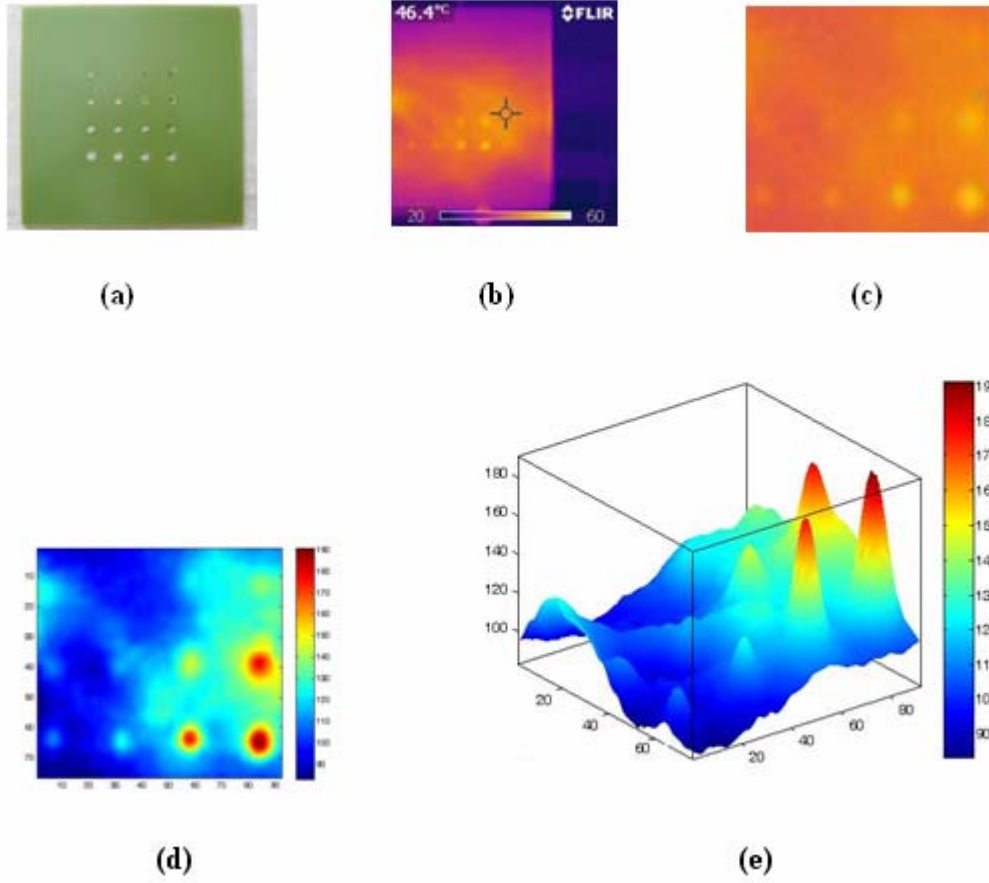
3.4.2.2. Dairesel Hasarların Analizi

Test işlemlerinde numune olarak, üzerinde farklı boyut ve derinlikte dairesel hasarlar bulunan levhaların kullanılması hangi boyuttaki ve hangi derinlikteki hasarların tespit edilebileceğini göstermesi açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Test işlemlerinde yarıçapları (r) 2-5 mm arasında değişen, ölçüm yapılan yüzeye olan uzaklıkları (d) 1-4 mm arasında değişen 16 adet dairesel hasar incelenmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Levha üzerindeki dairesel hasarların görünümü

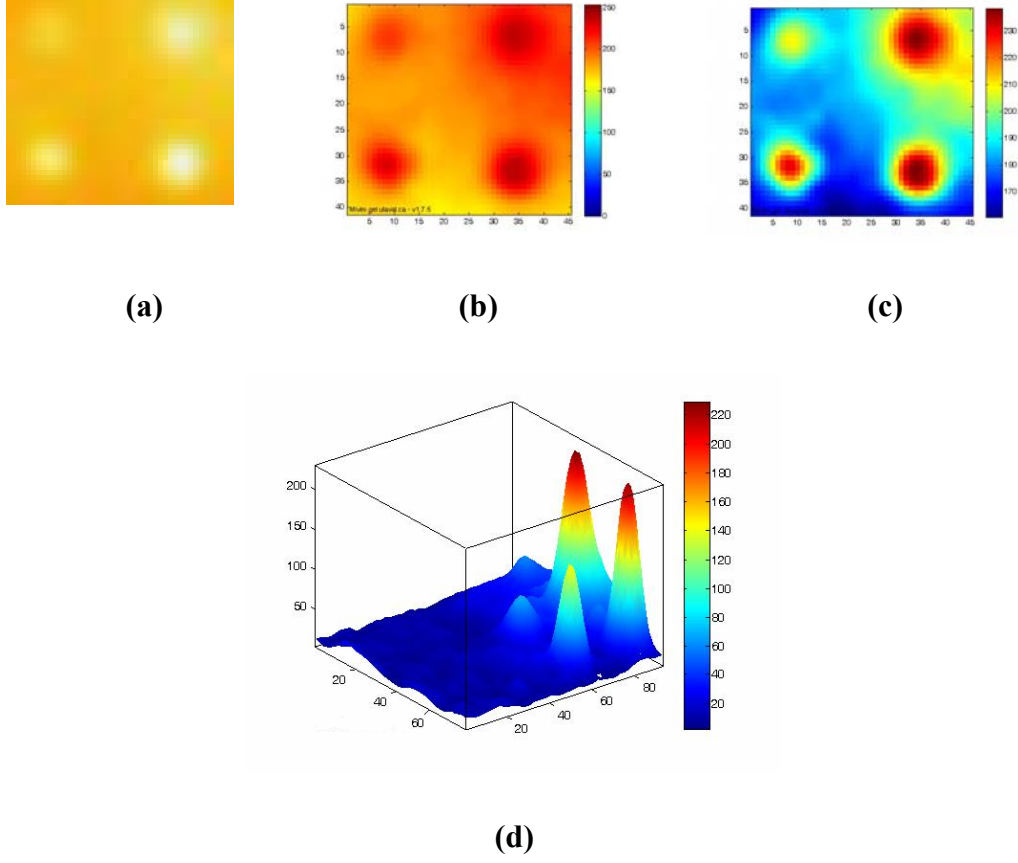
Dairesel hasarları analiz etmek için, üzerinde yukarıda belirtilen boyut ve derinlikte dairesel hasar bulunan epoksi levha ile test işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.15.a). Kızılötesi kamera ile numunenin sağlam yüzeyinden alınan test görüntülerinden herhangi bir tanesi ise Şekil 3.15.b’de görülmektedir. Şekil 3.15.c’de test görüntüsünden elde edilen ve hasarların bulunduğu bölgeyi kapsayan görüntü görülmektedir. Şekil 3.15.c’deki görüntü incelendiğinde Şekil 3.15.d’deki iki boyutlu (2D) ve Şekil 3.15.e’deki üç boyutlu (3D) görüntü elde edilmiştir. Şekil 3.15.e’deki üç boyutlu görüntüde x ve y eksenleri (0-100 değer aralığına sahiptir) numunede hasarın konum bilgisini verir. Z eksenini (0-255 değer aralığına sahiptir) ise hasarın derinlik ve alan değerleri bilgisinin elde edilmesini sağlayan piksel değerini belirtir.



Şekil 3.15. Dairesel hasarların analiz edilmesi

a) Test işlemine tabi tutulan malzeme, **b)** Kızılötesi kamera ile alınan bir test görüntüsü, **c)** Test görüntüsünde hasarların bulunduğu bölge, **d)** Hasarların iki boyutlu görüntüsü, **e)** Hasarların üç boyutlu görüntüsü

Şekil 3.15.a'daki malzemenin farklı bir test görüntüsünden 4 hasarın bulunduğu kısım (Şekil 3.16.a) incelendiğinde elde edilen iki boyutlu (2D) görüntü Şekil 3.16.b ve Şekil 3.16.c'de ve üç boyutlu (3D) görüntüsü Şekil 3.16.d'de görülmektedir. Özellikle üç boyutlu görüntüler hasarların analiz edilmesinde faydalıdır. Şekil 3.16.d'deki üç boyutlu görüntüde x ve y eksenleri (0-100 değer aralığına sahiptirler) numunede hasarın konum bilgisini verir. Z ekseni (0-255 değer aralığına sahiptir) ise hasarın derinlik ve alan değerleri bilgisinin elde edilmesini sağlayan piksel değerini belirtir.



Şekil 3.16. Dairesel hasarların analiz edilmesi

a) Test görüntüsünde hasarların bulunduğu bölge, **b)** Hasarların iki boyutlu görüntüsü-1, **c)** Hasarların iki boyutlu görüntüsü-2, **d)** Hasarların üç boyutlu görüntüsü

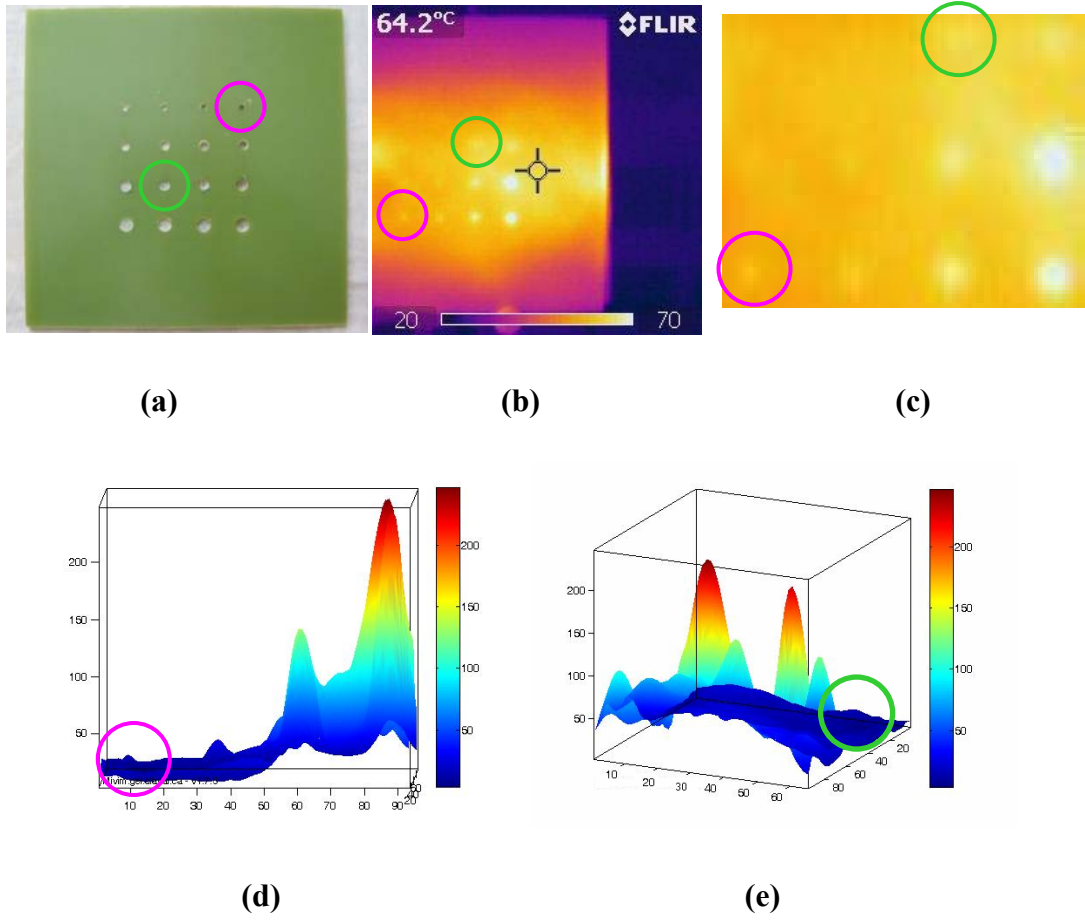
Isıtılan malzemenin kızılötesi termografi ile belirlenen yüzey sıcaklık dağılımı kullanılarak tahribatsız muayenesi işleminde yüzeyden alınan görüntüler üzerinde yapılan incelemeler ve özellikle üç boyutlu (3D) görüntülerin analizleri sonucunda dairesel hasalar ile ilgili aşağıdaki genellemeler yapılabilir:

- Geometrisi dairesel olan hasarların görüntüleri, analiz edilen kızılötesi görüntülerde belirgin bir şekilde, dairesel olarak ortaya çıkmaktadır.
- Yüzeye yakın olan hasarlar daha keskin/net bir dairesel görüntü vermektedir. Sıcaklık değerlerini ifade eden piksel değerlerindeki değişimde yine keskindir.

Diğer bir ifade ile hasarların bulunduğu bölgedeki piksel değerleri ile hasarların kenarlarında yer alan piksel değerleri arasındaki fark daha fazladır.

- Aynı ölçüde yüzeye uzak olan hasarlar daha dağınık (yayvan) bir sıcaklık dağılımı göstermektedir. Hasar ve çevre bölgesi arasındaki sıcaklık değişimleri düşüktür. Hasarların bulunduğu bölgedeki piksel değerleri ile hasarların kenarlarında yer alan piksel değerleri arasındaki fark daha azdır.

Dairesel hasarların tespiti ile ilgili yapılan testlerde dikkat çeken bir diğer husus ise derinlerde bulunan veya daha küçük boyuttaki hasarların alınan yüzey görüntülerinde çokta belirgin olarak görülememesidir. Şekil 3.17.a'da verilen ve üzerinde farklı boyut ve derinlikte dairesel hasarlar bulunan epoksi levhanın, kızılötesi kamera ile hasarsız ön yüzeyinden alınan herhangi bir test görüntüsünde tam belirgin olmayan hasar görüntüleri Şekil 3.17.b'de görülmektedir. Bu test görüntüsünden elde edilen ve hasarların bulunduğu bölgeyi kapsayan Şekil 3.17.c'deki görüntü analiz edildiğinde ve üç boyutlu görüntüler incelendiğinde belirgin olmayan hasarlar net bir şekilde görülmekte ve ilgili bölgede hasar olup olmadığına dair belirsizlik ortadan kalkmaktadır (Şekil 3.17.d ve Şekil 3.17.e). Şekil 3.17.d ve Şekil 3.17.e'deki üç boyutlu görüntülerde x ve y eksenleri (0-100 değer aralığına sahiptirler) numunede hasarın konum bilgisini verir. Z ekseni (0-255 değer aralığına sahiptir) ise hasarın derinlik ve alan değerleri bilgisinin elde edilmesini sağlayan piksel değerini belirtir.



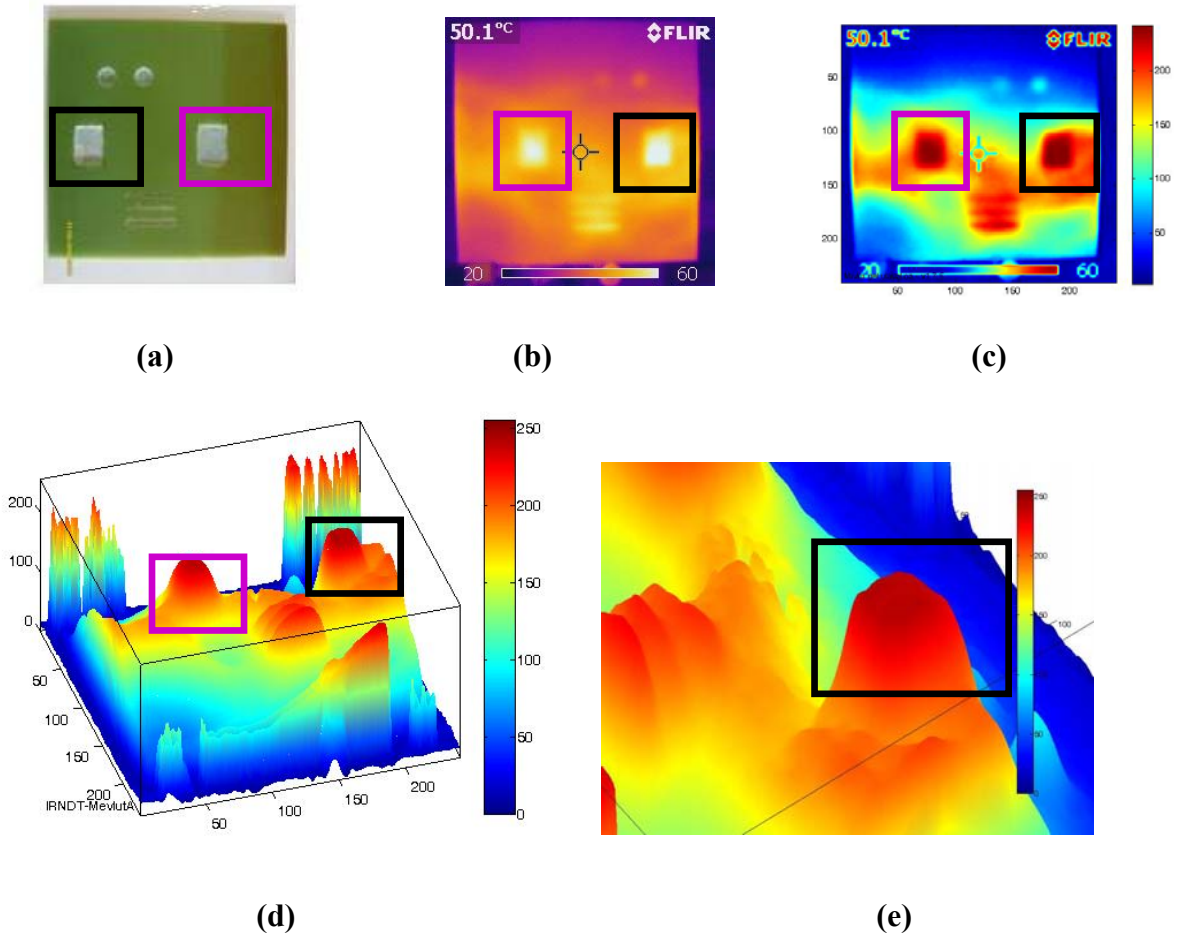
Şekil 3.17. Dairesel hasarların analiz edilmesi

a) Test işlemine tabi tutulan malzeme, **b)** Kızılötesi kamera ile alınan bir test görüntüsü, **c)** Test görüntüsünde hasarların bulunduğu bölge, **d)** Hasarların üç boyutlu görüntüsü-1, **e)** Hasarların üç boyutlu görüntüsü-2

3.4.2.3. Dikdörtgenel Hasarların Analizi

Dikdörtgenel hasarları analiz etmek için, üzerinde 3x4 cm boyutlarında, 2 mm (siyah çerçeve ile belirtilmiş) ve 3 mm (pembe çerçeve ile belirtilmiş) derinlikte dikdörtgenel hasarlar bulunan epoksi levha ile test işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.18.a). Kızılötesi kamera ile numunenin sağlam yüzeyinden alınan test görüntülerinden herhangi bir tanesi Şekil 3.18.b’de görülmektedir. Şekil 3.18.b’deki görüntü incelendiğinde Şekil 3.18.c’deki iki boyutlu (2D) görüntü ve Şekil 3.18.d’deki üç boyutlu (3D) görüntü elde edilmiştir. Şekil 3.18.d’deki üç boyutlu

görüntüde x ve y eksenleri (termal görüntü 240x240 piksel olduğu için 0-240 değer aralığına sahiptir) numunede hasarın konum bilgisini verir. Z eksenini (0-255 değer aralığına sahiptir) ise hasarın derinlik ve alan değerleri bilgisinin elde edilmesini sağlayan piksel değerini belirtir. 3 mm derinlikteki hasarın üç boyutlu yakınlştırılmış görünümü Şekil 3.18.e'deki gibidir.

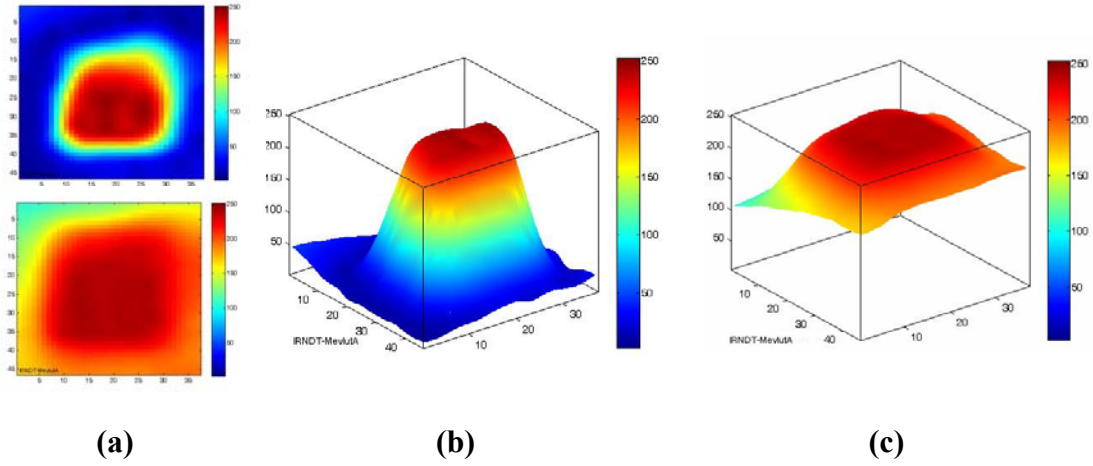


Şekil 3.18. Dikdörtgensel hasarların analiz edilmesi

- a)** Test işlemine tabi tutulan malzeme, **b)** Kızılötesi kamera ile alınan bir test görüntüsü, **c)** Hasarların iki boyutlu görüntüsü, **d)** Hasarların üç boyutlu görüntüsü, **e)** Dikdörtgensel hasarın üç boyutlu görüntüsü

Test görüntülerinde sadece dikdörtgensel hasarların incelenmesi sonucu elde edilen iki ve üç boyutlu dikdörtgensel hasar görüntüleri Şekil 3.19'da görülmektedir. Üç boyutlu görüntülerde x ve y eksenleri (0-50 değer aralığına sahiptir) numunede

hasarın konum bilgisini verir. Z eksenini (0-255 değer aralığına sahiptir) ise hasarın derinlik ve alan değerleri bilgisinin elde edilmesini sağlayan piksel değerini belirtir.



Şekil 3.19. Dikdörtgensel hasarların iki ve üç boyutlu görüntüleri

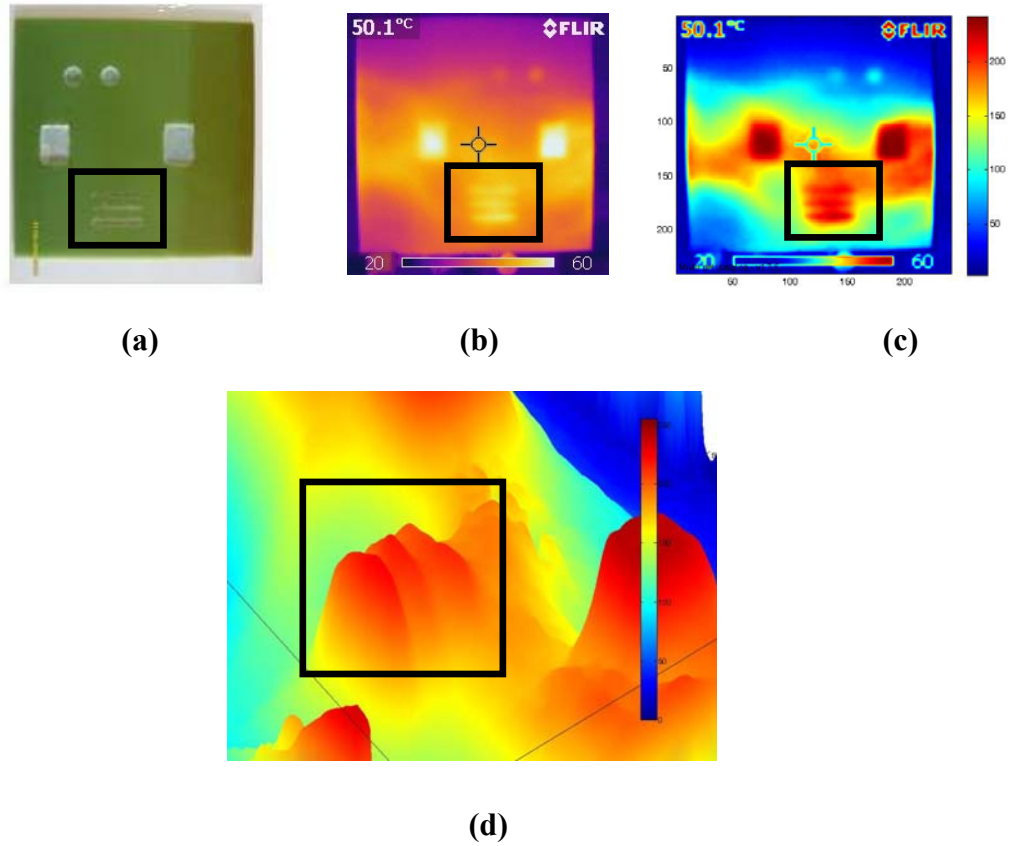
c) Hasarların iki boyutlu görüntüsü, b) Hasarların üç boyutlu görüntüsü-1,
c) Hasarların üç boyutlu görüntüsü-2

Isıtılan malzemenin kızılötesi termografi ile belirlenen yüzey sıcaklık dağılımı kullanılarak tahribatsız muayenesi işleminde yüzeyden alınan görüntüler üzerinde yapılan incelemeler ve özellikle üç boyutlu görüntülerin analizleri sonucunda dikdörtgensel hasarlar ile ilgili aşağıdaki genellemeler yapılabilir:

- Analiz edilen kızılötesi görüntülerde geometrisi dikdörtgensel olan hasarların görüntüleri dikdörtgensele çok yakın bir görüntü olarak ortaya çıkmaktadır.
- Yüzeye yakın olan hasarlar daha keskin/net bir dikdörtgensel görüntü vermektedir. Sıcaklık değerlerini ifade eden piksel değerlerindeki değişimde yine keskindir. Diğer bir ifade ile hasarların bulunduğu bölgedeki piksel değerleri ile hasarların kenarlarında yer alan piksel değerleri arasındaki fark daha fazladır.
- Aynı ölçüde yüzeye uzak olan hasarlar daha dağınık (yayvan) bir sıcaklık dağılımı göstermektedir, hasar ve çevre bölgesi arasındaki sıcaklık değişimleri düşüktür. Hasarların bulunduğu bölgedeki piksel değerleri ile hasarların kenarlarında yer alan piksel değerleri arasındaki fark daha azdır.

3.4.2.4. Çizgisel Hasarların Analizi

Yapılan testlerde çizgisel hasarlarda incelenmiştir. Üzerinde çizgisel hasarlar bulunan levhalarla yapılan testlerde, çizgisel hasarlar açık bir şekilde teşhis edilmiştir. Test görüntülerinin iki ve üç boyutlu analizi sonucu çizgisel hasarlar belirgin bir şekilde görülmektedir. Örneğin çizgisel hasarları analiz etmek için, üzerinde 3x50 mm ve 5x50 mm boyutlarında, 1,5 mm, 2 mm ve 2,5 mm derinlikte çizgisel hasarlar bulunan epoksi levha ile test işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.20.a). Kızılötesi kamera ile numunenin sağlam yüzeyinden alınan test görüntüsü Şekil 3.20.b’de görülmektedir. Şekil 3.20.b’deki görüntü incelendiğinde Şekil 3.20.c’deki iki boyutlu görüntü elde edilmiştir. Şekil 3.20.b’deki görüntü üç boyutlu incelendiğinde ise çizgisel hasarlar daha açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 3.20.d).



Şekil 3.20. Çizgisel hasarların analiz edilmesi

a) Test işlemine tabi tutulan malzeme, b) Kızılötesi kamera ile alınan bir test görüntüsü, c) Hasarların iki boyutlu görüntüsü, d) Hasarların üç boyutlu görüntüsü

Kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene işleminde yüzeyden alınan görüntüler üzerinde yapılan incelemeler ve görüntülerin üç boyutlu analizleri sonucunda çizgisel hasarlar ile ilgili aşağıdaki genellemeler yapılabilir:

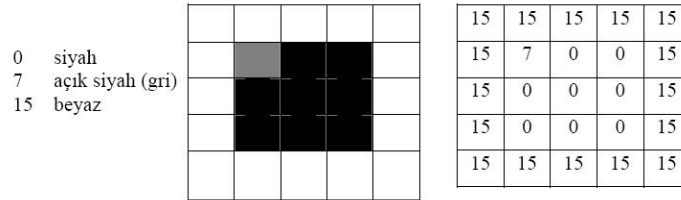
- Analiz edilen kızılötesi görüntülerde geometrisi çizgisel olan hasarların görüntüleri çizgisel olarak ortaya çıkmaktadır.
- Yüzeye yakın olan hasarlar daha keskin/net bir çizgisel görüntü vermektedir. Sıcaklık değerlerini ifade eden piksel değerlerindeki değişimde yine keskindir. Diğer bir ifade ile hasarların bulunduğu bölgedeki piksel değerleri ile hasarların kenarlarında yer alan piksel değerleri arasındaki fark daha fazladır.
- Aynı ölçüde yüzeye uzak olan hasarlar daha dağınık (yayvan) bir sıcaklık dağılımı göstermektedir, hasar ve çevre bölgesi arasındaki sıcaklık değişimleri düşüktür. Hasarların bulunduğu bölgedeki piksel değerleri ile hasarların kenarlarında yer alan piksel değerleri arasındaki fark daha azdır.

3.4.3. Görüntü İşleme Çalışmaları ve Hasarları Belirleme

Isıtılan malzemenin kızılötesi termografi ile belirlenen yüzey sıcaklık dağılımı kullanılarak tahribatsız muayenesi işleminde yüzeyden alınan görüntüler üzerinde yapılan incelemeler sonucunda malzemenin iç yapısında hasar olup/olmadığı ve hasar varsa hasarın sayısı, konumu, boyutu ve ölçüm yapılan ön yüzeye olan uzaklığı tahmin edilebilmektedir. Bu çalışmada hasarları belirleme ile ilgili çalışmalarda kızılötesi kamera ile malzemenin ön yüzeyinden alınan görüntüler gri seviye (gray-level) ve ikili (binary) formata dönüştürülerek kullanılmıştır. Bu yüzden önce bu kavramlar ile ilgili temel bilgileri vermek faydalı olacaktır.

Gri Seviye: Görüntü üzerindeki aydınlatma değerlerinin farklı seviyelerde olması, piksel düzeylerinin farklı olmasındandır. Görüntü siyah-beyaz renk tonlarından meydana geliyorsa, görüntü üzerindeki her bir nokta gri seviye ölçek üzerindeki renk değerleriyle ifade edilir. Görüntü üzerindeki noktalar farklı olduğundan, her bir aydınlatma düzeyi için gerekli bitlerin yerleşimi farklıdır. Örneğin dört bitlik yani 16 farklı gri seviye aydınlanma değeri için her bir pikselin üzerinde bulunacak gri

seviye parlaklık değeri 0-15 arasında bir değer olacaktır (Şekil 3.21). Bu gibi değişik düzeylerin oluşturduğu görüntüler, gri seviye veya gri seviye ölçek ile ifade edilirler [56].



Şekil 3.21. Dört bitlik gri seviye sayısal resim ve piksel değerleri

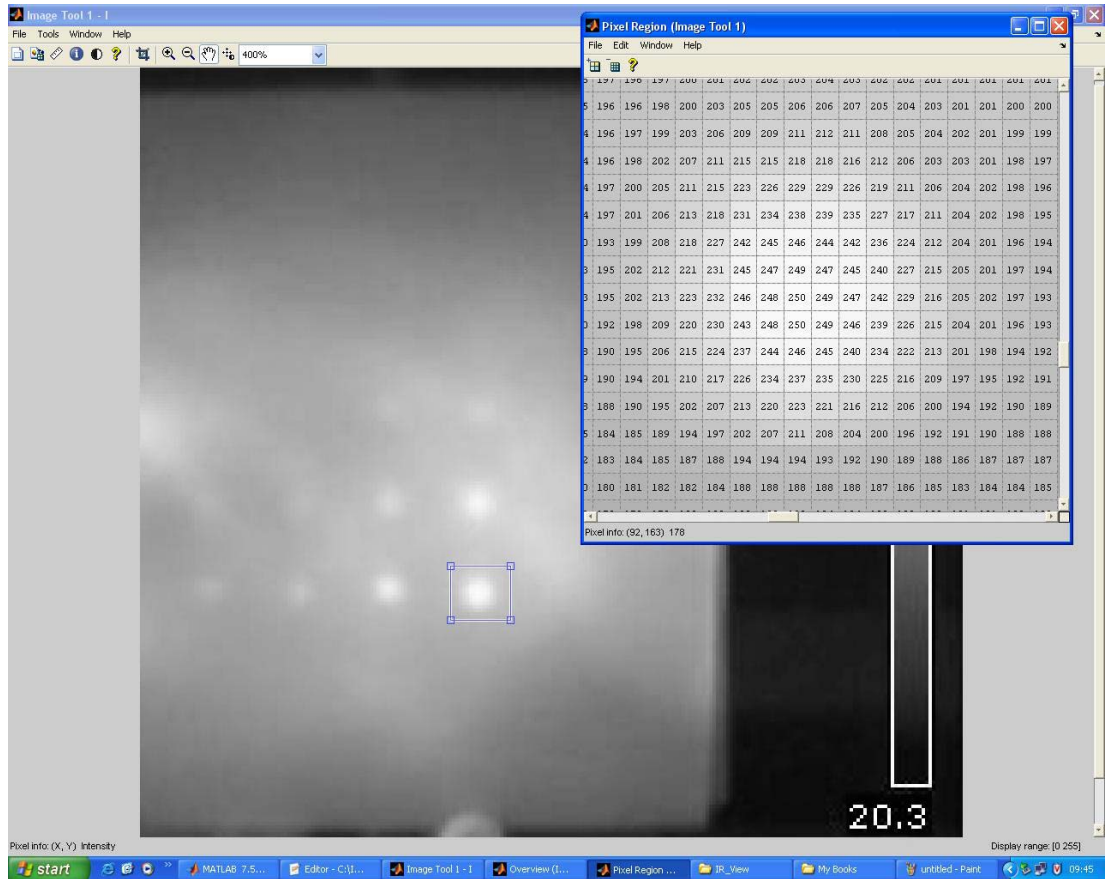
Isıtılan malzemenin kızılötesi termografi ile belirlenen yüzey sıcaklık dağılımı kullanılarak tahribatsız muayenesi işleminde kızılötesi kamera ile malzemenin ön yüzeyinden alınan görüntüler 8 bit gri seviye (gray-level) ile incelendiğinde piksel değerleri 0-255 arasında değerler almaktadır. Soğuk bölgelere karşılık gelen piksel değerleri 0'a yakın, sıcak bölgelere karşılık gelen piksel değerleri ise 255'e yakın değerler almaktadır. Diğer bir ifade ile ilgili görüntü gri seviye bir görüntü haline dönüştürülünce soğuk bölgeler siyaha yakın, sıcak bölgeler ise beyaza yakın renk değerlerine sahip olmaktadır. Daha önceki bölümlerde ifade edildiği gibi incelenen malzeme iç yapısında (yüzey altında) bir hasar içeriyor ise hasar olan bölgede farklı bir ısı dağılımı oluşmakta ve ısı dağılımı kızılötesi kamera ile görüntülenince de hasar ortaya çıkmaktadır. Gri seviye ile incelenen görüntülerde hasarlı bölgelerin 255 (beyaz)'e daha yakın değerler aldığı görülmüş, incelenen tüm malzeme görüntüsü içinde böylece belirginlik doğmuştur [56].

Şekil 3.22'de yapılan bir testten alınan test görüntüsünün gri seviyeye dönüştürülmüş hali görülmektedir. Görüntüye ait piksel değerleri incelendiğinde hasarların bulunduğu bölgelere karşılık gelen piksel değerlerinin diğer kısımlara göre farklı değerler aldığı görülmektedir. Burada en alt sağ köşede yer alan hasar üzerinde yapılan incelemede hatanın bulunduğu bölgeye karşılık gelen piksel değerlerinin 200-250 arasında, hatanın etrafındaki diğer piksel değerlerinin ise 160-200 arasında olduğu görülmektedir. Görüntüler üzerinde hasarlara karşılık gelen yerlerde piksel

değerlerinin farklılık göstermesi bu çalışmanın temelini teşkil etmekte ve sonuca ulaşmada büyük fayda sağlamaktadır.

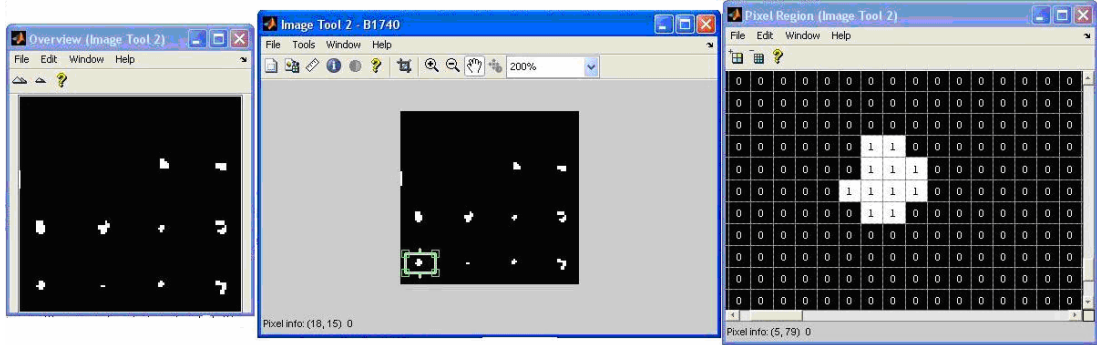
İkili (Binary) Resim: En basit durumda resimdeki pikseller 0 veya 1 değerini alırlar. Bu piksellerden oluşan resimlere ikili (binary) resim denir. 1 ve 0 değerleri sırasıyla aydınlık ve karanlık bölgeleri veya nesne ve zemini (nesnenin önünde veya üzerinde bulunduğu çevre zemini) temsil ederler [57]. Üzerinde çalışılan gri seviye resimde piksel değerleri için bir eşik değer alınıp bu eşik değer altında değerlere sahip piksellere yeni değer olarak "0" ve eşik değer üzerinde değerlere sahip piksellere yeni değer olarak "1" değerinin atanması sonucu ikili (binary) resim oluşur.

Şekil 3.23'te yapılan bir test sonucu elde edilen bir örnek test görüntüsünün hasarların bulunduğu bölümünün ikili formata dönüştürülmüş hali görülmektedir.



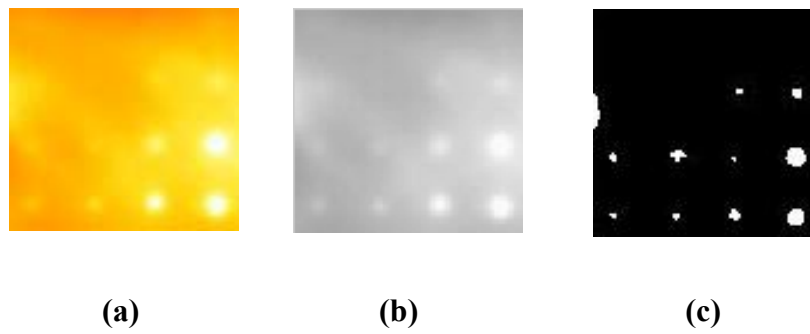
Şekil 3.22. Gri seviye test görüntüsü

Dönüştürme işlemi sonucu oluşan bu yeni görüntü sadece “0” ve “1” değerlerine sahip piksellerden oluşmaktadır. Yeni görüntüde hasarların bulunduğu bölgelere karşılık gelen bölümlerdeki pikseller “1” değerine sahipken, diğer kısımlardaki piksellerin değeri “0”dır.



Şekil 3.23. Hasarların ikili (binary) format görüntüleri

Görüntülerin format dönüşümleri ile ilgili olarak Şekil 3.24 incelenebilir. Yapılan bir testte alınan herhangi bir görüntü üzerinde hasarların bulunduğu bölüm Şekil 3.24.a’da görülmektedir. Şekil 3.24.a’daki görüntü gri seviye görüntüye dönüştürülünce Şekil 3.24.b ve bu gri seviye görüntü ikili formata dönüştürülünce Şekil 3.24.c’deki görüntü elde edilmektedir.



Şekil 3.24. Test görüntülerinin format dönüşümleri

- a) Test görüntüsünde hasarların bulunduğu bölge, b) Hasarların gri seviye görüntüsü
c) Hasarların ikili format görüntüsü

3.4.3.1. Sayısal Görüntülerinin Elde Edilmesi

Kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene uygulamasında test işleminin yöntemi ve test işleminden sayısal görüntülerinin elde edilmesi kısaca şu şekildedir: $t=0$ anında ısıtıcı lambalar yakılır, malzeme ısıtılmaya başlanır ve kızılötesi kamerada bu andan itibaren görüntü almaya başlar. Isıtma işlemi belirlenen süre boyunca devam eder. Bu arada da kızılötesi kamera görüntü almaya devam etmektedir. Belirlenen süre tamamlanınca da hem ısıtıcılar hem de kızılötesi kamera kapatılır. Kızılötesi kameranın kaydettiği görüntüler sayısal ortama (bilgisayar) aktarılır.

3.4.3.2. Görüntü İşleme Çalışmaları

Kızılötesi kameradan elde edilen ve bilgisayara aktarılan görüntüler üzerinde yapılan görüntü işleme çalışmaları Şekil 3.25'teki akış diyagramında gösterilmiştir. Burada belirtilen işlem adımları takip edilerek ve MATLAB programlama dili kullanılarak bir görüntü işleme uygulaması geliştirilmiştir. Çalışmada öncelikle 240x240 piksel değerine sahip görüntüler geliştirilen yazılıma okutulur. Okunan RGB (red-green-blue) renk uzayı formatındaki renkli resimler yazılımda öncelikle gri seviyeye çevrilir. Elde edilen görüntülerin 8 bit gri seviyeye çevrilmesi için gri seviye hesaplama formülü kullanılır ve bu formüle göre bir pikselin gri değeri;

$$Gri\ Değer = (0.2989 \times R) + (0.5870 \times G) + (0.1140 \times B) \quad (3.1)$$

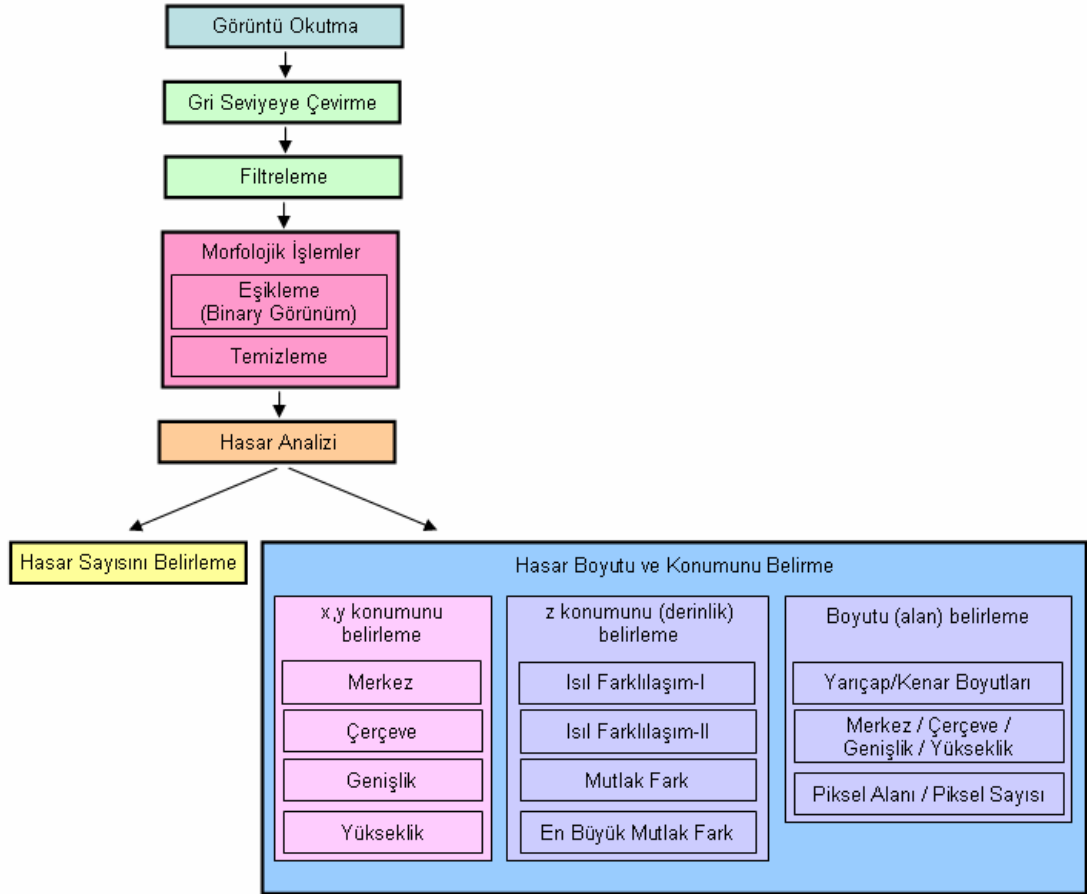
şeklinde hesaplanmaktadır. Burada R pikselin kırmızı, G pikselin yeşil ve B pikselin mavi değeridir [58].

Daha sonra ise gri seviyeye dönüştürülen görüntüler üzerinde görüntü kirliliklerinin (gürültü) giderilmesi (*noise reduction*) ve detayların daha belirgin hale getirilmesi (*sharpening*) gibi görüntü kalitesinin iyileştirilmesine (*image enhancement*) yönelik işlemler yapılır. Bu işlemlerin başında görüntülerin filtrelenmesi gelmektedir. Gürültüyü gidermek ve hasarların görünümünü netleştirmek için Medyan ve Gaussian filtreleri kullanılır [59]. Medyan filtre rasgele oluşan gürültüleri yok ederken

kenarları koruyan doğrusal olmayan bir prosestir. Medyan filtrede pikselin yeni değeri, komşu piksellerin sıralanarak medyan değerinin alınması ile elde edilir [60]. Bulanıklığı önleyerek, resimler üzerindeki gürültüyü gidermek için Gaussian filtresi de kullanılır.

Filtreleme sonucunda gürültüleri en aza indirilen ve iyileştirilen görüntülerde hasarları tespit edebilmek için bir takım morfolojik işlemler uygulanır. Morfolojik işlemler hasarların net bir şekilde görünmesi, boyutlarının ve konumlarının kestirilmesinde temel işlemlerdir. Morfolojik işlemler sonucunda ikili (binary) formata dönüşen görüntüde hasarlar belirgin bir şekilde ortaya çıkar.

Görüntü işleme ile hasar analizi ile hasar sayısı, hasarların boyutu ve konumu belirlenir. Hasarın x,y konumunu belirlemede hasarların merkez, çerçeve (bounding box), genişlik (width) ve yükseklik (height) değerlerinden faydalanılır. Hasarın z konumunu diğer bir ifade ile ölçüm yapılan yüzeye olan uzaklığını belirlemek için ısı farklılaşım değerleri, bu ısı farklılaşım değerlerinin mutlak farkları ve mutlak farkların en büyük değerleri (en büyük mutlak fark) kullanılır. Hasarın boyutunu belirlemek için dairesel hasarlarda yarıçap (veya çap), dikdörtgensel hasarlarda kenar boyutları, çizgisel hasarlarda boy ve kalınlık değerlerinden faydalanılır. Önceki işlemlerde hasarın x,y konumunu belirlemek için elde ettiğimiz merkez, çerçeve genişlik ve yükseklik değerlerinden hasarın boyutunu belirlemede yine faydalanılır. Hasarın boyutunu belirlemede ayrıca piksel alan ve piksel sayısı değerlerinden de faydalanılır.



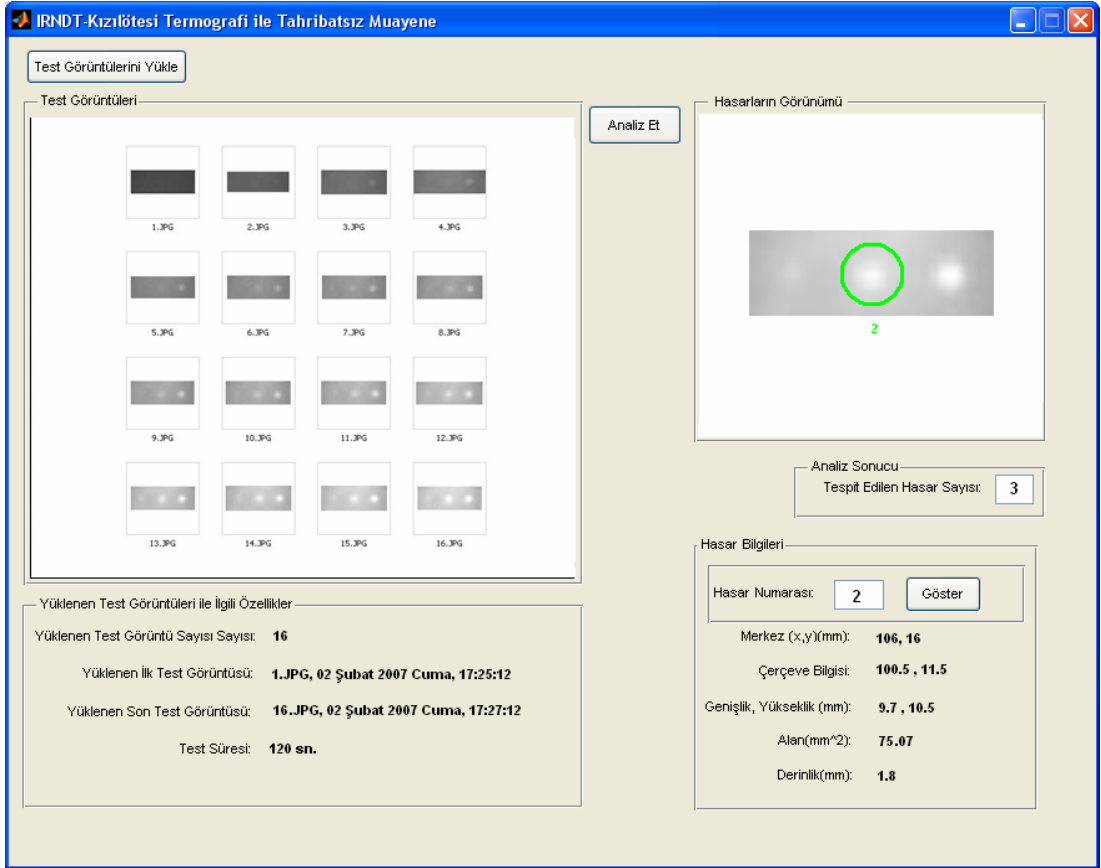
Şekil 3.25. Görüntü işleme akış diyagramı

3.4.3.3. Hasarların Belirlenmesi

3.4.3.3.1. Hasar Sayısının Belirlenmesi

Tez çalışmasında, kızılötesi kameradan elde edilen termal görüntülerin ve termal görüntülerden elde edilen sıcaklık dağılımının görüntü analizleri yapılarak malzemenin iç yapısında herhangi bir hasarın olup olmadığını, hasar var ise kaç tane hasar olduğunu, hasarın boyutunu ve yerini (malzemedeki konumunu ve ölçüm yapılan yüzeye olan uzaklığını/derinliğini) tespit eden bir bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir. Görüntü işleme teknikleri kullanılarak geliştirilen yazılıma ait arayüzün görüntüsü Şekil 3.26'da görülmektedir. Yazılımı kullanarak hasar sayısını belirlemek için öncelikle geliştirilen yazılımın arayüzünde “Test Görüntülerini

Yükle” düğmesine basılarak test görüntüleri yazılıma yüklenir. Yüklenecek test görüntüsü gri seviye olabileceği gibi renkli görüntüde olabilir (renkli görüntü yüklenirse gri seviyeye dönüşüm otomatik olarak yazılım içinde yapılır). 3.4.3.2’de bahsedilen ve akış diyagramında verilen işlem adımları sırasıyla “Analiz Et” düğmesine basıldıktan sonra gerçekleştirilir. Yazılım, analiz sonucunda ilk olarak tespit edilen hasar sayısını verir.



Şekil 3.26. Hasarları belirlemek için geliştirilen bilgisayar yazılımının arayüzü

3.4.3.3.2. Hasar Boyutu ve Konumunun Belirlenmesi

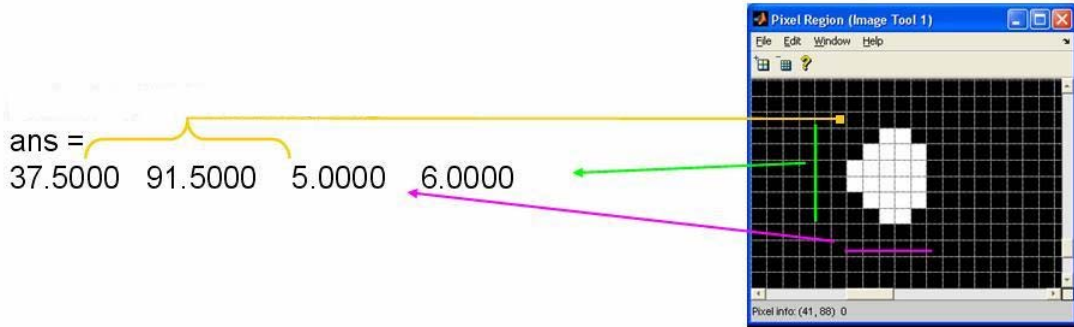
Hasarın x,y Konumunun Belirlenmesi: Bu tez çalışmasında sunulan yaklaşımda, hasarın x,y konumunu belirleyebilmek için hasarın;

- Merkez
- Çerçeve (bounding box)
- Genişlik (width) ve Yükseklik (height)

değerleri belirlenir (Şekil 3.27 ve Şekil 3.28). Bir test boyunca alınan görüntülerde hasarın bahsedilen bu değerleri dizilere aktarılarak hafızaya alınır ve saklanır. Daha sonra bu değerler ile yapılan hesaplamalarla hasarın x,y konumu belirlenir.



Şekil 3.27. Hasar merkezinin konumunun belirlenmesi



Şekil 3.28. Hasarın çerçevesinin, genişlik ve yükseklik değerlerinin belirlenmesi

Hasarın Boyutunun (Alanının) ve z konumunun (Ölçüm Yapılan Yüzeyle Olan Uzaklığının) Belirlenmesi: Isıtılan malzemenin kızılötesi termografi ile belirlenen yüzey sıcaklık dağılımı kullanılarak tahribatsız muayenesi işleminde, malzemenin yüzeyinden alınan termal görüntüler üzerinde yapılan inceleme ve analizler

sonucunda hasarın boyutu ve bu hasarların ölçüm yapılan yüzeye olan uzaklığı (malzeme içindeki konumları) tahmin edilebilmektedir. Burada malzemedeki iç hasar, yüzey sıcaklık değişimini etkilemekte, bu değişim yüzeyden alınan termal görüntülerde belirlemektedir. Hasar boyutları ve hasarların yüzeye olan uzaklıklarını belirlemek için ise öncelikle test boyunca alınan termal görüntüler tek tek incelenir. Burada;

- Termal görüntülerde hasar görüntüleri ile ilgili olarak; dairesel hasarlarda çap veya yarıçap, dikdörtgensel hasarlarda kenar boyutları, çizgisel hasarlarda boy ve kalınlık değerleri dikkate alınır. Bu değerler ile yaklaşık alan hesaplanabilir.
- Hasarın merkez noktası, çerçeve, genişlik ve yükseklik bilgileri kullanılarak yaklaşık alanı hesaplanabilir.
- Hasarın piksel cinsinden alanı belirlenir. Bu değer, bir pikselin yaklaşık alan değeri ile çarpılarak alan hesaplanabilir.

Bulunan bu alan değerlerinin ortalaması alınarak yaklaşık bir alan değeri hesaplanabilir. Kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene çalışması için hazırlanan test düzeneğinden alınan görüntülerde yaklaşık olarak bir pikselin bir kenarının boyu 1,167 mm ve alanı ise 1,362 mm²'dir. Bu ölçüler test görüntülerinden hasarların gerçek boyutlarına daha yakın tahminlerde bulunmayı sağlamaktadır.

Örneğin Şekil 3.29'da görülen dairesel hasarın yarıçap (2 piksel) bilgisinden faydalanılarak hesaplanan yaklaşık alanı;

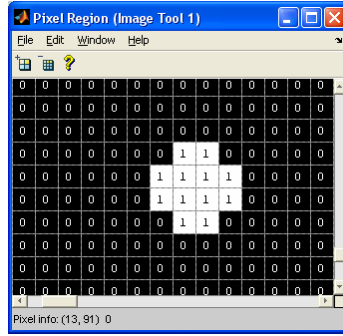
$$\pi r^2 = 3,142 \times (2 \times 1,167)^2 = 17,116 \text{ mm}^2 \text{ 'dir.}$$

Çerçeve, genişlik ve yükseklik bilgisi kullanılarak hesaplanan yaklaşık alanı;

$$(4 \times 1,167 \text{ mm}) \times (4 \times 1,167 \text{ mm}) = 21,790 \text{ mm}^2 \text{ 'dir.}$$

Hasarın piksel cinsinden alanı (14 piksel) ise; $14 \times 1,362 \text{ mm}^2 = 19,068 \text{ mm}^2$ 'dir.

Böylece üç farklı yaklaşımla hesaplanan bu alan değerlerinin ortalaması alınarak hasarın yaklaşık alanı 19,325 mm² olarak bulunur.

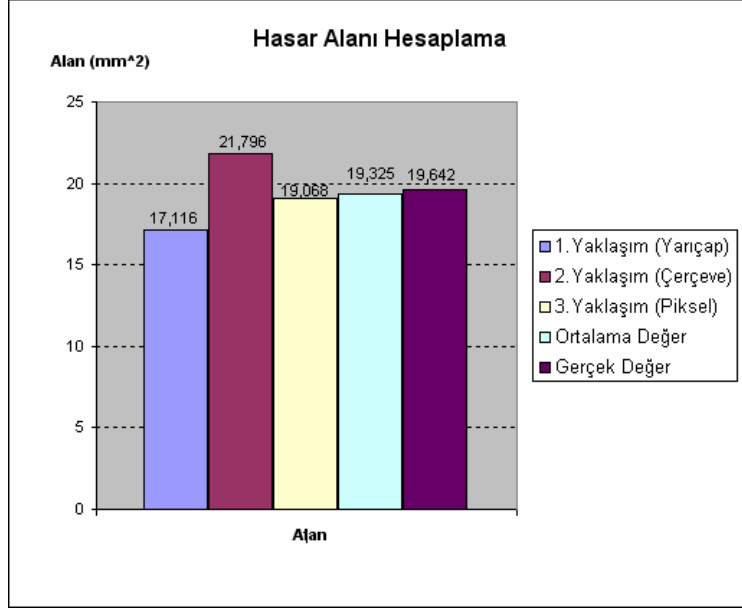


Şekil 3.29. Boyut (alan) hesabı için örnek hasar görüntüsü

Şekil 3.29’da görülen dairesel hasarın, alan hesaplamada kullanılan üç farklı yaklaşımla elde edilen tahmini alan değerleri, üç farklı yaklaşımla hesaplanan bu tahmini alan değerlerinin ortalaması alınarak elde edilen tahmini alan değeri ve hasarın gerçek alan değeri (daireSEL hasarın yarıçapı: 2,5 mm, alanı: 19,643 mm² dir) Çizelge 3.1’de ve grafiksel olarak ise Şekil 3.30’da görülmektedir. Çizelge 3.1 ve Şekil 3.30’da görüldüğü gibi alan tahmininde herhangi bir yaklaşımın kullanılması yerine üç farklı yaklaşımla hesaplanan tahmini alan değerlerinin ortalamasının alınması gerçek alan değerine yakın bir alan tahmini yapmayı sağlamaktadır. Bu nedenle uygulamada üç farklı yaklaşımla hesaplanan tahmini alan değerlerinin ortalamasının alınması yöntemi tercih edilmektedir. Bu yaklaşım yapılan alan tahmininde daha başarılı sonuçlar alınmasını sağlamakta ve geliştirilen bilgisayar yazılımının başarımını arttırmaktadır.

Çizelge 3.1. Alan değerleri

Hasar Tipi	Alan Değerleri (mm ²)				
	1.Yaklaşım (Yarıçap)	2.Yaklaşım (Çerçeve)	3.Yaklaşım (Piksel)	Ortalama Değer	Gerçek Değer
Dairesel	17,116	21,796	19,068	19,325	19,642



Şekil 3.30. Hasar alan değerleri ve hesaplama

Kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene çalışması kapsamında bir test (IR133 kodlu test) boyunca alınan termal görüntüler ve oluşan ısıl farklılaşmalar Şekil 3.31’de görülmektedir. Alınan test görüntülerindeki bu ısıl farklılaşmalar incelenerek hasarların boyutları ve yüzeye olan uzaklıkları belirlenmektedir. Isıl farklılaşmaları hesaplamak için iki farklı yaklaşımdan faydalanılır. Birinci yaklaşımda hasar bölgesindeki piksellerin t zamanındaki değerleri ile hasarsız bölgedeki piksellerin t zamanındaki değerleri arasındaki farklar hesaplanır. Isıl farklılaşımı hesaplamak için kullanılan eşitlik;

$$C_1(i, j, t) = |T_{def}(i, j, t) - T_{non-def}(i, j, t)| \quad (3.2)$$

şeklindedir ve burada (i, j) pikselin termal görüntüdeki koordinatları, t zaman, $C_1(i, j, t)$ hesaplanan birinci ısıl farklılaşım, $T_{def}(i, j, t)$ hasarlı bölgedeki pikselin t zamanındaki değeri, $T_{non-def}(i, j, t)$ ise hasarsız bölgedeki pikselin t zamanındaki değeridir.

Isıl farklılaşımı hesaplamak için kullanılan ikinci yaklaşımda piksellerin t zamanındaki değerleri ile piksellerin t zamanından bir önceki zamanda $(t-1)$ alınan test görüntüsündeki değerleri arasındaki fark hesaplanır. Kullanılan eşitlik;

$$C_2(i, j, t) = T_{def}(i, j, t) - T_{def}(i, j, t-1) \quad (3.3)$$

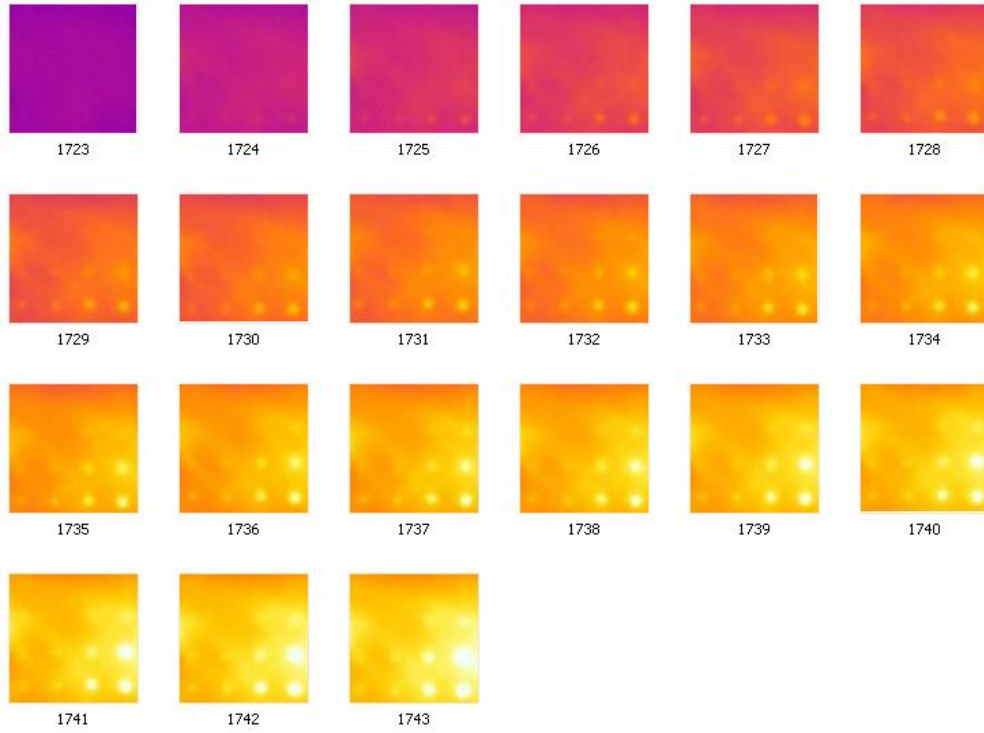
şeklindedir ve burada $C_2(i, j, t)$ hesaplanan ikinci ısıf farklılaşım, $T_{def}(i, j, t)$ hasar bölgesindeki pikselin t zamanındaki değeri, $T_{def}(i, j, t-1)$ ise bu pikselin t zamanından bir önceki zamanda alınan test görüntüsündeki değeridir.

Her iki yaklaşımla ifade edilen ve verilen eşitliklerle hesaplanan ısıf farklılaşımın mutlak farkları ise;

$$Cd_x(t) = |C_x(i, j, t) - C_x(i, j, t-1)| \quad (3.4)$$

eşitliğinden hesaplanır. Her bir yaklaşım için hesaplanan bu mutlak fark değerlerinden en büyüğünün ($\max(Cd_x(t))$) elde edildiği zaman bilgisi (t) bize hasarın z konumu (yüzeye olan uzaklığı) hakkında bilgi verir. Elde edilen küçük zaman değeri hasarın yüzeye yakın, büyük zaman değeri ise hasarın yüzeyden uzak (daha derinde) olduğunu gösterir [61,62].

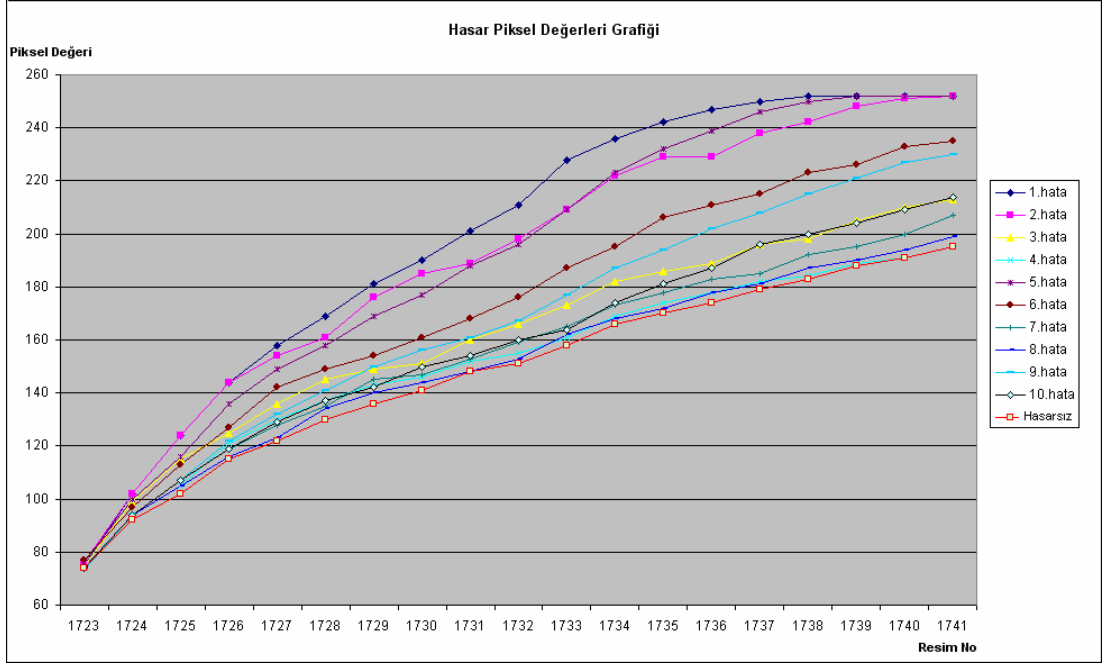
IR133 kodlu test işlemi boyunca elde edilen termal görüntülerde (Şekil 3.31) bulunan on hasarlı bölge ve hasarsız bölgeye ait piksel değerleri Çizelge 3.2’de yer almaktadır. Bu çizelgede 1., 2., 3., 4., 5., 6., 7., 8., 9., 10. hasarların piksel değerleri ve hasarsız bölgenin piksel değeri yer almaktadır. Şekil 3.32’de bu on hasarlı bölge ve hasarsız bölgeye ait piksel değerleri grafiği yer almaktadır. Çizelge 3.3’de Eşitlik (3.2)’den hesaplanan $C1.x$ değerleri yer almaktadır. Çizelge 3.4’te ise Eşitlik (3.4)’ten hesaplanan $Cd.x$ değerleri yer almaktadır. Çizelge 3.4’ten her bir hasar için elde edilen $\max(Cd_x(t))$ ’nin zaman bilgisi (t) bize hasarın z konumu (ölçüm yapılan yüzeye olan uzaklığı) hakkında bilgi verir.



Şekil 3.31. IR133 kodlu test işleminde alınan test görüntüleri ve ısıl farklılaşım

Çizelge 3.2. Hasarlı (10 farklı bölge) ve hasarsız bölgelere ait piksel değerleri

Resim No	1. hasar	2. hasar	3. hasar	4. hasar	5. hasar	6. hasar	7. hasar	8. hasar	9. hasar	10. hasar	Hasarsız
1723	75	76	75	74	76	77	74	74	73	74	74
1724	102	102	99	94	100	97	94	94	94	94	92
1725	124	124	115	105	116	113	107	105	107	107	102
1726	144	144	125	121	136	127	119	116	122	119	115
1727	158	154	136	130	149	142	128	123	132	129	122
1728	169	161	145	137	158	149	135	134	141	137	130
1729	181	176	149	143	169	154	145	140	150	142	136
1730	190	185	151	146	177	161	147	144	156	150	141
1731	201	189	160	152	188	168	153	148	161	154	148
1732	211	198	166	155	196	176	159	153	167	160	151
1733	228	209	173	161	209	187	165	162	177	164	158
1734	236	222	182	169	223	195	173	168	187	174	166
1735	242	229	186	174	232	206	178	172	194	181	170
1736	247	229	189	178	239	211	183	178	202	187	174
1737	250	238	196	182	246	215	185	181	208	196	179
1738	252	242	198	184	250	223	192	187	215	200	183
1739	252	248	205	189	252	226	195	190	221	204	188
1740	252	251	210	191	252	233	200	194	227	209	191
1741	252	252	213	195	252	235	207	199	230	214	195



Şekil 3.32. Hasarlı (10 farklı bölge) ve hasarsız bölgelere ait piksel değerleri grafiği

Çizelge 3.3. Eşitlik (3.2)'den hesaplanan C1.x değerleri

Resim No	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	C1.7	C1.8	C1.9	C1.10
1723	1	2	1	0	2	3	0	0	1	0
1724	10	10	7	2	8	5	2	2	2	2
1725	22	22	13	3	14	11	5	3	5	5
1726	29	29	10	6	21	12	4	1	7	4
1727	36	32	14	8	27	20	6	1	10	7
1728	39	31	15	7	28	19	5	4	11	7
1729	45	40	13	7	33	18	9	4	14	6
1730	49	44	10	5	36	20	6	3	15	9
1731	53	41	12	4	40	20	5	0	13	6
1732	60	47	15	4	45	25	8	2	16	9
1733	70	51	15	3	51	29	7	4	19	6
1734	70	56	16	3	57	29	7	2	21	8
1735	72	59	16	4	62	36	8	2	24	11
1736	73	55	15	4	65	37	9	4	28	13
1737	71	59	17	3	67	36	6	2	29	17
1738	69	59	15	1	67	40	9	4	32	17
1739	64	60	17	1	64	38	7	2	33	16
1740	59	58	17	2	59	40	7	1	34	16
1741	56	56	17	1	56	39	11	3	34	18

Çizelge 3.4. Eşitlik (3.4)'ten hesaplanan Cd.x değerleri

Resim No	Cd.1	Cd.2	Cd.3	Cd.4	Cd.5	Cd.6	Cd.7	Cd.8	Cd.9	Cd.10
1723	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1724	9	8	6	2	6	2	2	2	1	2
1725	12	12	6	1	6	6	3	1	3	3
1726	7	7	3	3	7	1	1	2	2	1
1727	7	3	4	2	6	8	2	0	3	3
1728	3	1	1	1	1	1	1	3	1	0
1729	6	9	2	0	5	1	4	0	3	1
1730	4	4	3	2	3	2	3	1	1	3
1731	4	3	2	1	4	0	1	2	2	3
1732	7	6	3	0	5	5	3	2	3	3
1733	10	4	0	1	6	4	1	2	3	3
1734	0	5	1	0	6	0	0	2	2	2
1735	2	3	0	1	5	7	1	0	3	3
1736	1	4	1	0	3	1	1	2	4	2
1737	2	4	2	1	2	1	3	2	1	4
1738	2	0	2	2	0	4	3	2	3	0
1739	5	1	2	0	3	2	2	2	1	1
1740	5	2	0	1	5	2	0	1	1	0
1741	3	2	0	1	3	1	4	2	0	2

IR133 kodlu test işlemi için, yukarıda verilen eşitlik ve çizelge değerleri kullanılarak elde edilen tahmini derinlik ve yarıçap (hasarın boyutunun tahmin edilmesinde kullanılacaktır) sonuçları Çizelge 3.5'te görülmektedir.

Çizelge 3.5. IR133 kodlu test işlemi için elde edilen tahmin sonuçları

Hasar Tahmin Çizelgesi	z-gerçek (mm)	z-tahmin (mm)	r-gerçek (mm)	r-tahmin (mm)
1.hasar	1	1	5	5,05
2. hasar	1	1	4	4,17
3. hasar	1	1	2,6	2,4
4. hasar	1	1,15	2	2,15
5. hasar	2	1,9	5	5,1
6. hasar	2	2	4	3,8
7. hasar	2	2	2,6	2,45
8. hasar	2	2	2	2,17
9. hasar	3	3	5	4,65
10.hasar	3	3	4	3,5

Aynı şekilde IR132 kodlu test işlemi için elde edilen tahmini derinlik ve boyut (yarıçap) sonuçları ise Çizelge 3.6’te görülmektedir.

Çizelge 3.6. IR132 kodlu test işlemi için elde edilen tahmin sonuçları

Hasar Tahmin Çizelgesi	z-gerçek (mm)	z-tahmin (mm)	r-gerçek (mm)	r-tahmin (mm)
1.hasar	1	1	5	5
5.hasar	2	1,9	5	5,1
9.hasar	3	3	5	4,8
13.hasar	4	4	5	4,7
2.hasar	1	1	4	4,15
6.hasar	2	2	4	4,2
10.hasar	3	3	4	3,7
3.hasar	1	1	2,6	2,45
7.hasar	2	2	2,6	2,4
11.hasar	3	3	2,6	2,3
4.hasar	1	1	2	2,2

3.5. Test Prosedürü

Isıtılan malzemenin kızılötesi termografi ile belirlenen yüzey sıcaklık dağılımı kullanılarak tahribatsız muayenesinde test prosedürü aşağıdaki gibidir:

- Test sürecinin başlatılması ve ön hazırlıklar
 - Test edilecek malzemenin ön incelemesi yapılır. Malzemenin türü ve bu çerçevede test parametreleri belirlenir.
 - Malzeme daha önce test edilmeyen türden bir malzeme ise aynı türden sağlam malzeme ile test parametreleri belirlenir.
 - Malzemenin yüzeyi parlak ise ölçüm yapılan yüzeyi matlaştırılır veya başka bir yöntem ile parlaklığı giderilir.
 - Test düzeneği hazırlanır.
 - Test edilecek malzeme parça tutucuya yerleştirilir.
 - Kızılötesi kamera tripoda takılır.

- Test edilecek malzeme, ısıtıcılar ve kızılötesi kamera konumlandırılır (belirtilen şekilde yerleştirilmeli, aralarındaki mesafelere dikkat edilmelidir).
- Isıtıcılara güç verilerek kontrol edilir.
- Geliştirilen yazılımın yüklü olduğu bilgisayar çalıştırılır.
- Kızılötesi kamera çalıştırılır.
- Geliştirilen yazılımın yüklü olduğu bilgisayar ile kızılötesi kameranın bağlantısı yapılır (USB arayüz kullanılarak).
- Test işlemi
 - Test başlatılır (t=0).
 - Isıtıcı lambalar yakılır ve hasarlı malzeme ısıtılmaya başlanır.
 - Kızılötesi kamera aktif edilir ve görüntü almaya başlanır.
 - Isıtma işlemine belirlenen süre boyunca devam edilir. Bu arada kızılötesi kamera ile görüntü almaya da devam edilir.
 - Belirtilen süre sonunda test sonlandırılır.
 - Isıtıcılar kapatılır.
 - Kızılötesi kameranın görüntü alma işlemi sonlandırılır.
- Geliştirilen yazılım ile hasarların analizi
 - Yazılım çalıştırılır.
 - Test görüntüleri kızılötesi kameradan yazılıma yüklenir.
 - Yazılımı arayüzündeki “Analiz Et” düğmesi tıklanarak hasarlar analiz edilir.
 - Tespit edilen hasar sayısı ve bu hasar(lar)a ait değerler (konum ve boyut bilgileri) ekranda görülür.
- Sonuçların alınması ve test sürecinin sonlandırılması
 - Geliştirilen yazılımdan tespit edilen hasar sayısı ve bu hasar(lar)a ait değerlerin (konum ve boyut bilgileri) çıktısı alınır.
 - Sonuçlar bilgisayara kaydedilir.
 - Yazılım kapatılır.
 - Bilgisayar kapatılır.
 - Kızılötesi kamera kapatılır.
 - Deney düzeneği toparlanır ve kaldırılır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Yapılan Tahminlerde Hata Oranları

Isıtılan malzemenin kızılötesi termografi ile belirlenen yüzey sıcaklık dağılımı kullanılarak tahribatsız muayenesi işleminde yüzeyden alınan görüntüler üzerinde yapılan incelemeler sonucunda malzemenin iç yapısında hasar olup/olmadığı ve hasar varsa hasarın sayısı, konumu, boyutu ve yüzeye olan uzaklığı tahmin edilebilmektedir. Hasarların boyutu ve yüzeye olan uzaklıkları hakkında yapılan tahminlerde hata oranları sırasıyla;

$$\%hata_r = \frac{r_{tah} - r}{r} \times 100 \quad (4.1)$$

$$\%hata_z = \frac{z_{tah} - z}{z} \times 100 \quad (4.2)$$

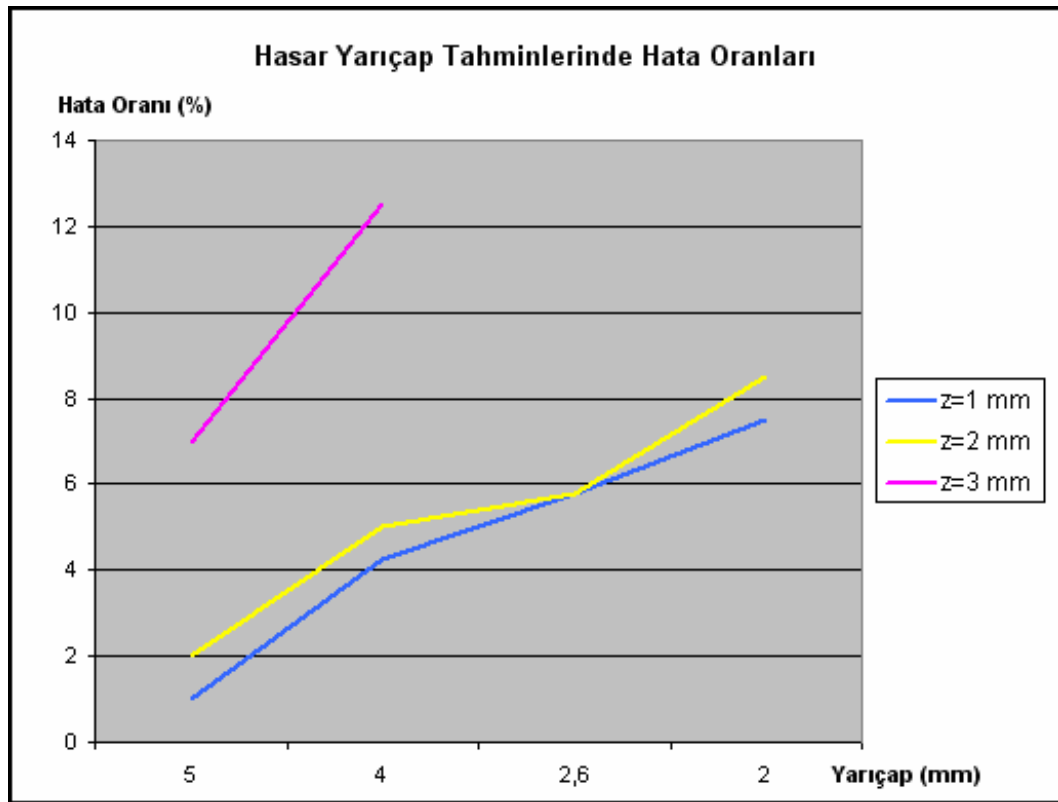
ile hesaplanır [30]. Burada r boyut, z derinlik, r_{tah} ve z_{tah} tahmini değerler, $\%hata$ ise yüzde cinsinden yapılan tahmindeki hata oranıdır.

IR133 kodlu test işlemi için hasarların gerçek boyutları (yarıçap), elde edilen boyut tahminleri ve yapılan tahminlerdeki hata oranları (Eşitlik 4.1 ile elde edilen) Çizelge 4.1'de görülmektedir. IR133 kodlu test işlemi için yapılan hasar yarıçap tahminlerinde hata oranları %1 ile %12,5 arasında değişmektedir.

Çizelge 4.1. IR133 kodlu test işlemi için yapılan tahminlerdeki hata oranları

Hata Oranları Çizelgesi	z (mm)	r-gerçek (mm)	r-tahmin (mm)	r-hata (%)
1. hasar	1	5	5,05	1
2. hasar	1	4	4,17	4,25
3. hasar	1	2,6	2,45	5,77
4. hasar	1	2	2,15	7,5
5. hasar	2	5	5,1	2
6. hasar	2	4	3,8	5
7. hasar	2	2,6	2,45	5,77
8. hasar	2	2	2,17	8,5
9. hasar	3	5	4,65	7
10. hasar	3	4	3,5	12,5

Hasar yarıçapları ile bu hasarların yarıçapları için yapılan tahminlerdeki hata oranı arasındaki ilişki Şekil 4.1’de verilen grafikte görülmektedir. Grafikte görüldüğü gibi aynı derinlikte bulunan hasarlar için yarıçap küçüldükçe, hasarların yarıçapları için yapılan tahminlerdeki hata oranı büyümektedir.



Şekil 4.1. Hasar yarıçap tahminlerinde hata oranları

IR132 kodlu test işlemi için ise hasarların gerçek boyutları (yarıçap), elde edilen boyut tahminleri ve yapılan tahminlerdeki hata oranları (Eşitlik 4.1 ile elde edilen) Çizelge 4.2’de görülmektedir.

IR133 kodlu test işlemi için hasarların gerçek derinlikleri ve geliştirilen yazılım ile elde edilen derinlik tahminleri Çizelge 3.4’te , IR132 kodlu test işlemi için hasarların gerçek derinlikleri ve geliştirilen yazılım ile elde edilen derinlik tahminleri Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 4.2. IR132 kodlu test işlemi için yapılan tahminlerdeki hata oranları

Hata Oranları Çizelgesi	z (mm)	r-gerçek (mm)	r-tahmin (mm)	r-hata (%)
1.hasar	1	5	5	0
5. hasar	2	5	5,1	2
9. hasar	3	5	4,8	4
13. hasar	4	5	4,7	6
2. hasar	1	4	4,15	3,75
6. hasar	2	4	4,2	5
10. hasar	3	4	3,7	7,5
3. hasar	1	2,6	2,45	5,77
7. hasar	2	2,6	2,45	5,77
11. hasar	3	2,6	2,3	11,5
4. hasar	1	2	2,2	10

Yapılan tahminlerde hata oranları detaylı bir şekilde incelendiğinde yapılan tahminler ve elde edilen sonuçlar ile ilgili olarak aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir;

- Aynı derinlikte fakat farklı boyutlardaki hasarlar için yapılan tahminlerde büyük boyutlu hasarlar için hata oranı düşüktür ve hasar boyutları küçüldükçe yapılan tahminlerde hata oranı büyümektedir,
- Aynı boyutta fakat farklı derinliklerdeki hasarlar için yapılan tahminlerde yüzeye yakın hatalar için hata oranı düşüktür ve hasarın bulunduğu derinlik arttıkça yapılan tahminlerde hata oranı büyümektedir,

- Sonuç olarak yüzeye yakın ve boyutu büyük hasarlar için yapılan tahminlerde hata oranı küçüktür. Derinlik arttıkça ve hasar boyutları da küçüldükçe yapılan tahminlerde hata oranı büyümektedir.
- Tüm testler dikkate alındığında (anormal test sonuçları hariç) yapılan tahminlerdeki hata oranları % 0 (hatasız)- % 13 arasında değişmektedir.

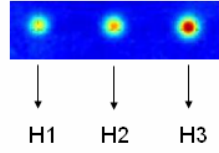
Düşük hata oranı aralığına sahip testler (örneğin IR132: %0- %11), test koşul ve parametrelerinin optimum/optimuma yakın olduğunu işaret eder.

4.2. Geliştirilen Yazılımın Test Edilmesi

Geliştirilen yazılımın test edilebilmesi için akademik düzeyde benzer çalışmalar yapan kişiler/yayın sahipleri ile iletişime geçilmesi sonucu iki test görüntü serisi ve bu görüntülerden elde edilen test sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu test görüntüleri geliştirilen bilgisayar yazılıma girilerek sonuçlar elde edilmiştir. Böylece hem bu tez çalışmasında sunulan yeni yaklaşımın ve bu yaklaşım doğrultusunda geliştirilen yazılımın başarımı ölçülmüş hem de elde edilen sonuçlar ile diğer çalışmalarda elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.

4.2.1. Test 1

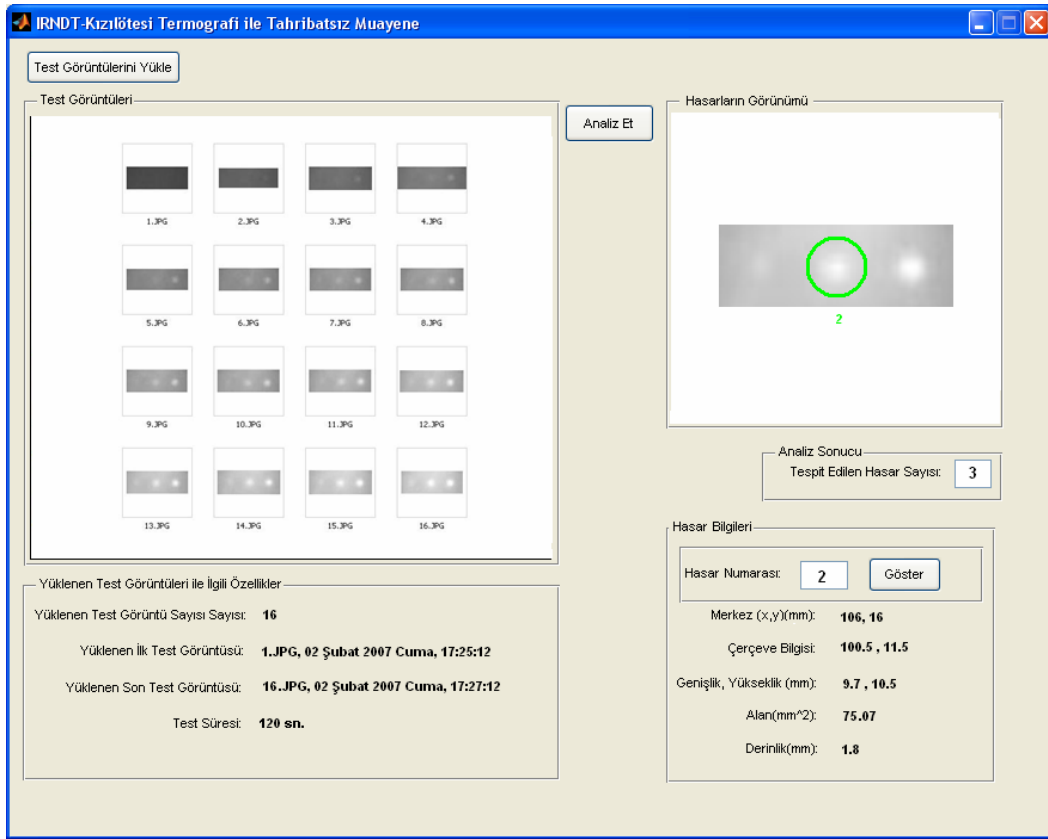
Kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene metodunu kullanarak hasar tespiti konusunda çalışmalar yapan Castanedo'nun bu çalışmalarından birinde elde ettiği görüntü serisine ve test sonuçlarına ulaşılmıştır [15, 63, 64]. Castanedo çalışmasında 4 mm. kalınlığında Plexiglas (PLEXI014-plastik cam) kullanmıştır. Kullanılan test numunesinde çapları aynı, derinlikleri farklı üç adet dairesel hasar bulunmaktadır (Şekil 4.1). Numuneye ait test görüntüleri geliştirilen yazılıma girilmiştir (Şekil 4.2).



HASAR	ÇAP (mm)	DERİNLİK (mm)
H1	10	1
H2	10	2
H3	10	3

Şekil 4.1. Test 1 numunesinde hasarların görünümü ve hasar değerleri

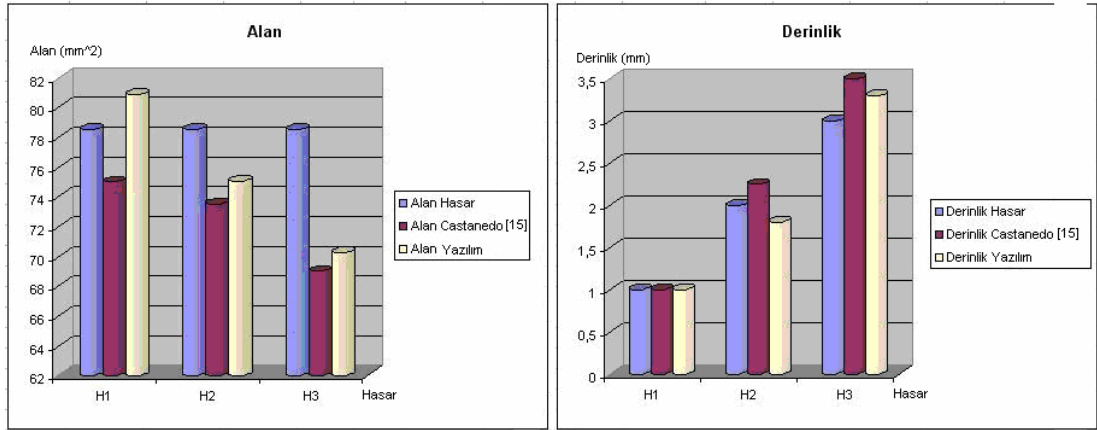
Yazılımdan alınan sonuçlar hasarların gerçek değerleri ile karşılaştırılarak bu tez çalışmasında sunulan yeni yaklaşımın ve bu yaklaşım doğrultusunda geliştirilen yazılımın başarımı ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar ilgili diğer çalışmanın sonuçları ile de karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.3). Ayrıca hata oranları da hesaplanmıştır (Çizelge 4.4). Hasar gerçek ve sonuç değerlerini gösteren grafik Şekil 4.23'te yer almaktadır.



Şekil 4.2. Test 1 görüntü serisinin geliştirilen yazılıma yüklenmesi

Çizelge 4.3. Test 1 için hasar ve sonuç değerleri

Hasar	Alan (mm ²)			Derinlik (mm)		
	Gerçek Değer	Castanedo [15]	Yazılım	Hasar	Castanedo [15]	Yazılım
H1	78,5	75	80,85	1	1	1
H2	78,5	73,5	75,07	2	2,25	1,8
H3	78,5	69	70,25	3	3,5	3,3



Şekil 4.3. Test 1 için hasar gerçek ve sonuç değerleri grafiği

Sonuçlar incelendiğinde;

- Geliştirilen yazılımdan elde edilen sonuçların, hasarların gerçek değerlerine yakın sonuçlar olduğu,
- Elde edilen sonuçların görüntü serilerinin temin edildiği çalışma sahibinin sonuçlarına göre daha iyi olduğu,
- Derinlik ve alan tahmininde hata oranlarının %0 - %10,5 aralığında olduğu,
- Hata oranlarının, görüntü serilerinin temin edildiği çalışma sahibinin elde ettiği sonuçların hata oranlarından (%0- %16) daha iyi olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.4. Test 1 için hata oranları (%)

Hasar	Alan (%)		Derinlik (%)	
	Castanedo [15]	Geliştirilen Yazılım	Castanedo [15]	Geliştirilen Yazılım
H1	4,4	3	0	0
H2	6,3	4,3	12,5	10
H3	12	10,5	16	10

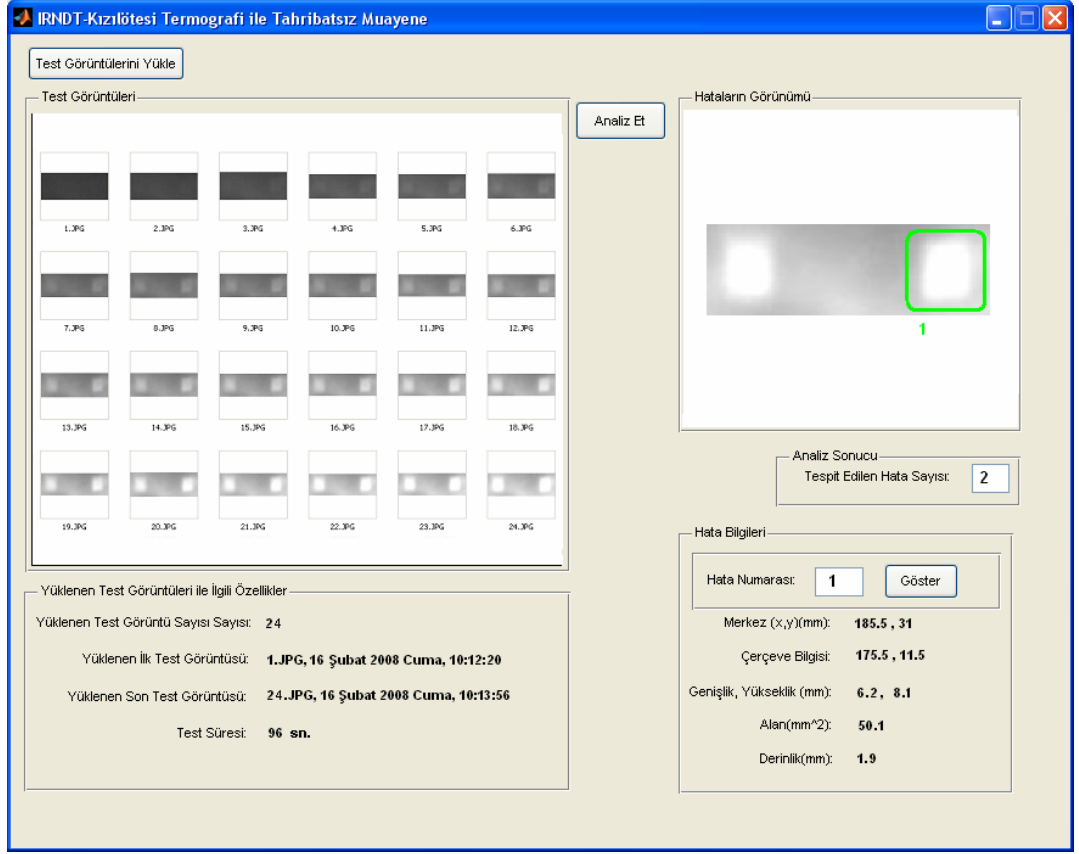
4.2.2. Test 2

Kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene metodunu kullanarak hasar tespiti ve derinlik tahmini konusunda çalışmalar yapan Darabi'nin doktora tezi çalışması sırasında elde ettiği bir görüntü serisine ve test sonuçlarına ulaşılmıştır [13]. Darabi çalışmasında 5 mm kalınlığında CFRP kompozit malzeme kullanmıştır. Kullanılan test numunesinde boyutları ve derinlikleri farklı 2 adet dikdörtgenel hasar bulunmaktadır (Şekil 4.4). Boyutları aynı (6x8 mm) ve derinlikleri farklı (2 mm ve 3 mm) olan A ve B hasarlarını kapsayan test görüntüleri geliştirilen yazılıma girilmiştir (Şekil 4.5).



HASAR	ALAN (mm ²)	DERİNLİK (mm)
A	48	3
B	48	2

Şekil 4.4. Test 2 numunesinde hasarların görünümü ve hasar değerleri

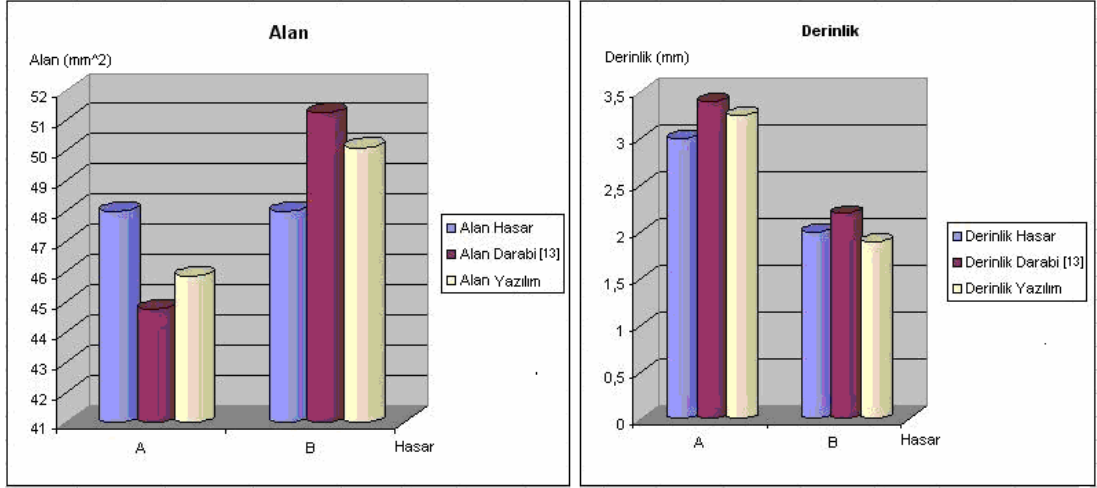


Şekil 4.5. Test 2 görüntü serisinin geliştirilen yazılıma girilmesi

Yazılımdan elde edilen sonuçlar hasarların gerçek değerleri ile karşılaştırılarak bu tez çalışmasında sunulan yeni yaklaşımın ve bu yaklaşım doğrultusunda geliştirilen yazılımın başarımı ölçülmüştür. Yazılımdan elde edilen sonuçlar diğer çalışmanın sonuçları ile de karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.5). Ayrıca hata oranları da hesaplanmıştır (Çizelge 4.6). Hasar gerçek ve sonuç değerlerinin grafiksel gösterimi Şekil 4.6'da yer almaktadır.

Çizelge 4.5. Test 2 için hasar ve sonuç değerleri

Hasar	Alan (mm ²)			Derinlik (mm)		
	Gerçek Değer	Darabi [13]	Geliştirilen Yazılım	Gerçek Değer	Darabi [13]	Geliştirilen Yazılım
A	48	44,75	45,85	3	3,4	3,25
B	48	51,25	50,1	2	2,2	1,9



Şekil 4.6. Test 2 için hasar ve sonuç değerleri grafiği

Numunede yer alan ve farklı derinliklerde yer alan iki dikdörtgenel hasara ait sonuç değerler ve hata oranları incelendiğinde;

- Geliştirilen yazılımdan elde edilen sonuçların, hasarların gerçek değerlerine yakın sonuçlar olduğu,
- Elde edilen sonuçların görüntü serilerinin temin edildiği çalışma sahibinin sonuçlarına göre daha iyi olduğu,
- Derinlik ve alan tahmininde hata oranlarının %3,3 - %8,3 aralığında olduğu,
- Hata oranlarının, görüntü serilerinin temin edildiği çalışma sahibinin elde ettiği sonuçların hata oranlarından (%6,5- %13,3) daha iyi olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.6. Test 2 için hata oranları (%)

Hasar	Alan (%)		Derinlik (%)	
	Darabı [13]	Yazılım	Darabı [13]	Yazılım
A	8	6,1	13,3	8,3
B	6,5	4,3	10	3,3

5. SONUÇLAR

Isıtılan malzemenin kızılötesi termografi ile belirlenen yüzey sıcaklık dağılımı kullanılarak tahribatsız muayenesi konulu tez çalışmasında kızılötesi termografi ve görüntü işleme teknikleri kullanılarak malzemelerin tahribatsız muayenesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemi gerçekleştirmek için laboratuarda; kızılötesi kamera, ısı kaynağı, bilgisayar vb. temel bileşenleri içeren bir test düzeneği oluşturulmuş, detaylı analizler yaparak malzemenin iç yapısında herhangi bir hasarın olup olmadığını, hasar var ise kaç tane olduğunu, hasarın boyutunu ve yerini (hasarın ölçüm yapılan yüzeye olan uzaklığını/ derinliğini) tespit eden bir yazılım geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında sunulan yeni yaklaşım doğrultusunda ve görüntü işleme teknikleri kullanılarak geliştirilen yazılım;

- Tespit edilen hasar sayısını vermektedir.
 - Hasarın x,y konumunu hasara ait
 - Merkez,
 - Çerçeve (bounding box) bilgisi,
 - Genişlik (width) ve yükseklik (height) değerlerini kullanarak belirlemektedir.
 - Hasar boyutlarını ve hasarların yüzeye olan uzaklıklarını belirlemek için test boyunca alınan termal görüntüler tek tek incelemektedir.
 - Termal görüntülerde hasar görüntüleri ile ilgili olarak; dairesel hasarlarda çap veya yarıçap, dikdörtgensel hasarlarda kenar boyutları, çizgisel hasarlarda boy ve kalınlık değerlerini kullanmaktadır. Bu değerler ile yaklaşık alan hesaplamaktadır.
 - Hasarın merkez noktası, çerçeve, genişlik ve yükseklik bilgilerini kullanarak yaklaşık alan hesaplamaktadır.
 - Hasarın piksel cinsinden alanını belirlemektedir. Bu değer, bir pikselin yaklaşık alan değeri ile çarpılarak alan hesaplamaktadır.
- Bu alan değerlerinin ortalamasını alarak yaklaşık bir alan değeri hesaplamaktadır.

- Test görüntülerindeki ısıf farklılaşımını hesaplayarak hasarların boyutları ve yüzeye olan uzaklıklarını belirlemektedir. Isıl farklılaşımını hesaplamak için iki farklı yaklaşımdan faydalanılmaktadır.
 - Birinci yaklaşımda hasar bölgesindeki piksellerin t zamanındaki değeri ile hasarsız bölgedeki piksellerin t zamanındaki değeri arasındaki farkları hesaplanmaktadır.
 - İkinci yaklaşımda piksellerin t zamanındaki değeri ile piksellerin t zamanından bir önceki zamanda ($t-1$) alınan test görüntüsündeki değeri arasındaki farkları hesaplanmaktadır.
 - Her iki yaklaşımla elde edilen ısıf farklılaşımının mutlak farklarını hesaplayarak, bu mutlak fark değerlerinden en büyüğünün ($\max(Cd_x(t))$) elde edildiği zaman bilgisini (t) tespit etmektedir. Bu zaman değeri hasarın z konumu (yüzeye olan uzaklığı) hakkında bilgi vermektedir. Elde edilen küçük zaman değeri hasarın yüzeye yakın, büyük zaman değeri ise hasarın yüzeyden uzak (daha derinde) olduğunu göstermektedir.

Bu tez çalışmasında sunulan yeni yaklaşımı ve bu yaklaşım doğrultusunda geliştirilen yazılımı test etmek amacıyla TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) Malzeme Enstitüsü'nden ve özel bir firmadan (Plast-Form Kimya San. ve Tic. Ltd. Şti.);

- Karbon elyaf takviyeli plastik (Carbon Fiber Reinforced Plastic- CFRP) kompozit,
- Cam elyaf takviyeli plastik (Glass Fiber Reinforced Plastic- GFRP) kompozit,
- E-cam elyaf takviyeli polyester (E-Glass Fiber Reinforced Polyester- GFRP) kompozit,
- Epoksi

levhalar tedarik edilmiştir. Tedarik edilen bu levhalar farklı yapılarla ve kalınlıklara (3, 5, 6, 10 ve 12,5 mm) sahiptir. Bu levhalara farklı derinlik ve boyutlarda hasarlar (dairesef, dikdörtgensel, çizgisel vb.) oluşturularak 250'den fazla test yapılmıştır ve 10000 civarında test görüntüsü alınmıştır.

Tez çalışması boyunca geliştirilen yazılım ile ilgili iyileştirme çalışmalarına test görüntüleri üzerinde yapılan detaylı analiz ve incelemeler doğrultusunda devam edilmiştir. Özellikle hasarların boyutları ve derinlikleri için yapılan tahminlerde elde edilen sonuçlar hasarların gerçek değerleri ile karşılaştırılarak tahminlerdeki hata oranları hesaplanmış, bu hata oranlarının en aza indirgenmesi için yazılımda sürekli iyileştirmeler yapılmıştır.

Yapılan tahminlerde ortaya çıkan hata oranları detaylı bir şekilde incelendiğinde yapılan tahminler ve elde edilen sonuçlar ile ilgili olarak aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir;

- Aynı derinlikte fakat farklı boyutlardaki hasarlar için yapılan tahminlerde büyük boyutlu hasarlar için hata oranı düşüktür ve hasar boyutları küçüldükçe yapılan tahminlerde hata oranı büyümektedir.
- Aynı boyutta fakat farklı derinliklerdeki hasarlar için yapılan tahminlerde yüzeye yakın hasarlar için hata oranı düşüktür ve hasarın bulunduğu derinlik arttıkça yapılan tahminlerde hata oranı büyümektedir.
- Yüzeye yakın ve boyutu büyük hasarlar için yapılan tahminlerde hata oranı küçüktür. Derinlik arttıkça ve hasar boyutları da küçüldükçe yapılan tahminlerde hata oranı büyümektedir.
- Tüm testler dikkate alındığında (anormal test sonuçları hariç) yapılan tahminlerdeki hata oranları % 0 (hatasız)- % 13 arasında değişmektedir.
- Düşük hata oranı aralığına sahip testler, test koşul ve parametrelerinin optimum/optimuma yakın olduğunu işaret eder.

Bu tez çalışmasında sunulan yeni yaklaşımı, bu yaklaşım doğrultusunda geliştirilen yazılımı test etmek için akademik düzeyde benzer çalışmalar yapan kişiler/yayın sahipleri ile iletişime geçilmesi sonucu iki test görüntü serisi ve bu görüntülerden elde edilen test sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu test görüntüleri geliştirilen yazılıma girilerek sonuçlar elde edilmiştir. Böylece hem bu tez çalışmasında sunulan yeni yaklaşım ve bu yaklaşım doğrultusunda geliştirilen yazılımın başarımı ölçülmüş hem de elde edilen bu sonuçlar ile diğer çalışmalarda elde edilen sonuçların

karşılaştırılması yapılmıştır. Geliştirilen yazılımdan elde edilen sonuçlar incelendiğinde;

- Geliştirilen yazılımdan elde edilen sonuçların, hasarların gerçek değerlerine yakın sonuçlar olduğu,
- Elde edilen sonuçların görüntü serilerinin temin edildiği çalışma sahibinin sonuçlarına göre daha iyi olduğu,
- Derinlik ve alan tahmininde hata oranlarının %0 - %10,5 aralığında olduğu,
- Hata oranlarının, görüntü serilerinin temin edildiği çalışma sahiplerinin elde ettiği sonuçların hata oranlarından (%0- %16) daha iyi olduğu görülmüştür.

Tez çalışması boyunca karşılaşılan güçlükler aşağıdaki gibidir:

- Testlerde kullanılacak numune malzemelerin temininde güçlük çekilmiştir. Sadece özel bir firmadan ve TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü'nden malzeme sağlanabilmiştir.
- Hasarlı malzeme temin edilememiştir. Bulunan sağlam malzemelere değerleri bilinen örnek hasarlar oluşturularak testler yapılabilmektedir.
- Uygun test koşul ve parametrelerinin belirlenmesi çalışmaları bir hayli vakit almış, yapılan 100 civarındaki test işleminden sonra uygun şart ve değerler belirlenebilmiştir.
- Kullanılan kızılötesi kameraların çözünürlük değerlerinin düşük olması hasarların ve hasarlara ait değerlerin belirlenmesini güçleştirmiştir.
- Hasarların derinlik ve boyut tahmini yapılırken bu iki değer ilişkili olması analizleri güçleştirmiştir. Hasarlara ait doğru değerlerin elde edilebilmesi için yazılımın ilgili kısmının geliştirilmesi bir hayli vakit almıştır.
- Boyutu küçük ve derinlerde bulunan hasarların tespit edilmesi oldukça güçtür. Boyutu belirli bir değer altında olan hasarlar tespit edilememiştir. Bu güçlük ayrıca incelenecek malzemelerin inceliği ile ilgili sınır getirmiştir.
- Güçlü ısıtıcı temin edilememiş, mümkün olan en güçlü ısıtıcı yapısı oluşturularak testler yapılmıştır.

- Termal kayıplar test görüntülerinde netliğe etki etmiştir. Bu kaybı azaltmak için test süresi mümkün olduğunca kısaltılmış, ısıtıcılar test edilen malzemeye yakın konumlandırılmış ve bu sorunun etkisini azaltma yönünde geliştirilen yazılımda ilgili düzenlemeler yapılmıştır.
- Yüzeyi parlak malzemeler test edilirken yansıma ve parlama sorunu ortaya çıkmıştır. Testte hatalı sonuçlar alınmasına neden olan bu sorunu gidermek için yüzeyi parlak malzemelerin ölçüm yapılan yüzeyleri matlaştırılmıştır.

Tez çalışması sonunda, istenildiği anda kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene işlemi gerçekleştirmek için Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde yer alan laboratuara kalıcı test düzeneği kurulmuştur. Böylece istenildiği zaman kızılötesi termografi ile tahribatsız muayene testi yapılabilecek ve test düzeneği akademik çalışmalarda kullanılabilir.

Isıtılan malzemenin kızılötesi termografi ile belirlenen yüzey sıcaklık dağılımı kullanılarak tahribatsız muayenesi ile ilgili öneriler aşağıdaki gibidir:

- Hasar değerleri ile ilgili yapılan tahminlerde, yüksek çözünürlüklü kızılötesi kamera kullanımı ile başarı oranının arttırılabileceği değerlendirilmektedir.
- Yüzeyi parlak malzemelerin test edilmeden önce ölçüm yapılan yüzeylerinin matlaştırılmasının veya başka bir yöntem (flat paint ile kaplama vb.) ile bu yüzeyin parlaklığının giderilmesinin, hasar değerleri ile ilgili yapılan tahminlerde başarı oranını arttırılabileceği değerlendirilmektedir.
- Test düzeneğinde test edilecek malzeme, ısıtıcılar ve kızılötesi kameranın konumu (yerleri, aralarındaki mesafeler vb.) belirtilen şekilde olmalıdır aksi halde yazılımdan yanlış sonuçlar alınabileceği ve testin başarısız olabileceği değerlendirilmektedir.
- Termal kayıpların test görüntülerinde netliğe etkisini azaltmak için;
 - Test süresi mümkün olduğunca kısa tutulması gerektiği değerlendirilmektedir (Önerilen test süresi aşılmamalıdır).

- Isıtıcıların test edilen malzemeye yakın konumlandırılmaması gerektiği değerlendirilmektedir (Isıtıcıların konumları için belirtilen hususlara dikkat edilmelidir).
- Isıtmanın düzgün yapılması, yansıma ve parlamaları önlemek için ısıtıcıların konumu ve test edilen malzemeye uzaklığının iyi ayarlanması gerektiği değerlendirilmektedir. Bu konuda belirtilen parametreler dikkate alınmalıdır.
- Güçlü ısıtıcı temin edilememiş, mümkün olan en güçlü ısıtıcı yapısı oluşturularak testler yapılmıştır. Daha güçlü ısıtıcılar temin edilerek testler yapıldığında hasarlar ile ilgili daha sağlıklı tahminlerde bulunulabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Tmiri, A., Sahnoun, S., Thermal Non Destructive Testing in the Frequency Domain. 8th European Conference on NDT (ECNDT Conference) , Barcelona, s. 283-294, 2002.
- [2] Yılmaz, A.O., İnfrared Yöntemle Termal Deşarj İncelemesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2002.
- [3] Maldague, X., Introduction to NDT by Active Infrared Thermography. Materials Evaluation (60): 1060-1073, 2002.
- [4] Maldague, X., Infrared Methodology and Technology. Gordon and Beach Science Publishers, Langhorne, 1994.
- [5] Gaussorgues, G., Infrared Thermography. Chapman & Hall, London, 1994.
- [6] Trimm, M., An Overview of Nondestructive Evaluation Methods. Practical Failure Analysis 3(3): 17-31, 2003.
- [7] Soluk, E., İnfrared Ölçümleme ile Isı Transferi İncelemesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2003.
- [8] Szabra, D., Swiderski, W., Infrared Thermographic Detection of Destruction Area in Composite Armours. Mezinarodni Conference Pyrotechniku 2002, Luhacovice, s.127-132, 2002.
- [9] Sahnoun, S., Belattar, S., Thermal Non-destructive Testing Study of a Circular Defect in Plane Structure. NDT 8, 84-92, 2003.
- [10] Meola, C., Carlomagno, G.M., Recent Advances in the Use of Infrared Thermography, Measurement Science Technology (15): 27–58, 2004.
- [11] Maldague, X., Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. A Wiley- Interscience Publication, New York, 2001.
- [12] Luo, B., Liebenberg, B., Automatic Thermographic Image Defect Detection of Composites. Thermosense: Thermal Infrared Applications 33 (80130S): 1-9, 2011.
- [13] Darabi A., Detection and Estimation of Defect Depth in Infrared Thermography Using Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic. Doktora Tezi, Laval Üniversitesi, Kanada, 2000.

- [14] Badghaish, A., Fleming, D., Quantitative Characterization of Resistive Defects in Thick Composites Using Step Heating Thermography. *Thermosense 30 (6939)*: 1-16, 2008.
- [15] Castanedo C., Quantitative Subsurface Defect Evaluation by Pulsed Phase Thermography: Depth Retrieval with the Phase. Doktora Tezi, Laval Üniversitesi, Kanada, 2005.
- [16] Yıldız, H., NDT Yöntemleri. İTÜ Yayınları, İstanbul, 2006.
- [17] Günay, Y., Değirmenci, S., Demir Döküm Sektöründe Tahribatsız Muayenenin Önemi ve Uygulamaları. 2. Uluslararası NDT Sempozyumu ve Sergisi, İstanbul, s. 212-224, 2003.
- [18] Bilge,A.N., Tuğrul,B., Endüstriyel Radyografinin Esasları. İTÜ Yayınları, İstanbul,1990.
- [19] Forsyth, D.S., Yolken, H.T., A Brief Introduction to Nondestructive Testing. *The AMMTIAC Quarterly 1 (2)*: 7-10, 2003.
- [20] Rummel, W.D., Matzkanin, G.A., Nondestructive Evaluation Capabilities Data Book (3. Baskı). Nondestructive Testing Information Analysis Center, ABD,1997.
- [21] Bossi, R.H., Iddings, F.A., Wheeler G.C., Moore, P.O., Radiographic Testing, Nondestructive Testing Handbook (3. Baskı). American Society for Nondestructive Testing, Columbus OH, 2002.
- [22] Morgan, L. N., Electromagnetic Nondestructive Evaluation with Simple HTS SQUIDS: Measurements and Modelling. *IEEE Trans. Appl. Supercond. (5)*: 3127–3130, 1995.
- [23] Günay, Y., Değirmenci, S., Şirin, B., Magnetik Parçacık Yöntemi İle Dökme Demirlerde Çatlak Oluşum Mekanizmalarının İncelenmesi. 2. Uluslararası NDT Sempozyumu ve Sergisi, İstanbul, s. 171-178, 2003.
- [24] Değirmenci, S., Şirin, B., Otomotiv Sanayii için Döküm Parça Üreten Demir Döküm Fabrikalarında Tahribatsız Muayenenin Önemi ve Uygulamaları. 2.Uluslararası Döküm Kongresi, İstanbul, s. 96-109, 2001.
- [25] Bouden, M., Wave Propagation and Scattering in Layered Media: Application to Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Interfacial Cracks and Earthquake Ground Motion. Doktora Tezi, Colorado Üniversitesi, Colorado, 1990.

- [26] Shmerr, L.W., Jen, C.K., Kobayashi, M., Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization. World Scientific Publishing, Singapore, 2007.
- [27] Sfarra, S., Theodorakeas, P., Importance of Integrated Results of Different Non-Destructive Techniques in order to Evaluate Defects in Panel Paintings: The Contribution of Infrared, Optical and Ultrasonic Techniques. O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology III (Proc. of SPIE (8084)): 1-13, 2011.
- [28] Halmshaw, R., Non-destructive Testing. E. Arlond Press, London, 1991.
- [29] Wolfe, W.L., Zissis, G.J., The Infrared Handbook. Environmental Research Institute of Michigan, Washington, 1993.
- [30] Kaplan, H., Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment. SPIE Optical Engineering Press, Washington, 1999.
- [31] Theodorakeas, P., Avdelidis, N.P., Automated Transient Thermography for the Inspection of CFRP Structures: Experimental Results and Developed Procedures. Thermosense: Thermal Infrared Applications 33 (80130W):1-11, 2011.
- [32] Almond, D.P., Peng, W., Thermal Imaging of Composites. Journal of Microscopy (201): 163-170, 2001.
- [33] Aggelis, D.G., Kordatos, E. Z., Soulioti, D. V., Matikas, T. E., Combined Use of Thermography and Ultrasound for the Characterization of Subsurface Cracks in Concrete, Construction and Building Materials (24):1888-1897, 2010.
- [34] Kordatos, E.Z., Strantza, M., Soulioti, D.V., Matikas, T.E., Aggelis, D.G., Combined NDT Methods for Characterization of Subsurface Cracks in Concrete, Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks and Systems (7982):1-6, 2011.
- [35] Vincent, J.D., Fundamentals of Infrared Detector Operating and Testing. John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [36] Tolluoğlu, A.O., Kargın, S., Uçan, O.N., Kent, S., Hücresel Yapay Sinir Ağları İle Kızılötesi Görüntülerde Gürültünün Temizlenmesi. Havacılık Ve Uzun Teknolojileri Dergisi 2(1): 77-86, 2005.
- [37] Bahçebaşı, A., Gece Görüş Cihazlarından Alınan Görüntünün İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara, 2006.

- [38] Shumaker, D. L., Wood, J. T., Thacker, C. R. , FLIR Performance Handbook. DCS Corp., Virginia, ABD, 2001.
- [39] Heryol, L., Ünal, N., İnfrared Güdümlü Silahlar ve alışma Prensipleri. Hava Harp Okulu Yayınları, İstanbul, 1996.
- [40] Avşar, S., Kızılötesi Arayıcılar, Kızılötesi Karşı Tedbirler ve Simülasyonları. Yüksek Lisans Tezi. Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2003.
- [41] şensoy, B., Türkiye’de Termal Görüntüleme Teknolojisi. Savunma Teknolojileri Kongresi (SAVTEK) 2002, Ankara, s. 371-379, 2002.
- [42] Yaman, K., Aktürk, N., Görüntü İşleme ile Kişi Yoğunluklarının Belirlenmesi. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu (UMTS), Eylül 2001, Konya, s.56-68, 2001.
- [43] Harp Akademileri Komutanlığı Yayınları, Hava Kuvvetlerinde Elektronik Harekat. Harp Akademileri Basım Evi, İstanbul, 2000.
- [44] Swiderski,W., Military Applications of İnfrared Thermography Nondestructive Testing in Poland. Military Institute of Armament Technology, Poland, 2003.
- [45] Schaefer, G., Zhu, S.Y., Jones, B., Retrieving Thermal Medical Images. 24th International Conference IEEE Engineering in Medicine and Biology, Ekim 2002, Houston, Texas, ABD, s. 491-499, 2002.
- [46] Maldague, X. P.V., İnfrared Methodology and Technology. Gordon and Breach Science Publishers, ABD, 1994.
- [47] Starnes, M. A., Carino, N. J., Active İnfrared Thermography for NDT of Concrete Structures Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer. Journal of Materials Evaluation (57): 56-63, 2005.
- [48] Castanedo, C., Active Thermography Signal Processing Techniques for Defect Detection and Characterization on Composite Materials. Thermosense 32 (76610): 1-9, 2010.
- [49] Wu, C., Zhang, W., Numerical Analysis and Experimental Researches on Active İnfrared Thermographic NDT in Composite Materials. Proc. of SPIE (8193): 1-6, 2011.
- [50] Castanedo,C., Piau, J.M., Guilbert, S., Comparative Study of Active Thermography Techniques for the Nondestructive Evaluation of Honeycomb Structures. Review in Nondestructive Evaluation (20):1-31, 2009.

- [51] Avdelidis N.P., Castanedo, C., Bendada, A., Maldague, X., A Study of Active Thermography Approaches for the Non-Destructive Testing and Evaluation of Aerospace Structures, Proceedings of SPIE (6939): 1-6, 2008.
- [52] www.flirthermography.com (Erişim tarihi: 30.09.2011).
- [53] Pratt, W.K., Digital Image Processing. John Wiley & Sons Inc., New York, 2001.
- [54] Gonzalez, R.C., Digital Image Processing. Prentice Hall, ABD, 2002.
- [55] Sharma G., Digital Color Imaging Handbook. CRC Press, New York, 2003.
- [56] Yaman, K., Görüntü İşleme Yönteminin Ankara Hızlı Raylı Ulaşım Sistemi Güzergahında Sefer Aralıklarının Optimizasyonuna Yönelik Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, 2000.
- [57] Umbaugh, S., Computer Vision and Image Processing. Prentice Hall PTR, New Jersey, ABD, 1997.
- [58] Image Processing Toolbox User's Guide, MATLAB, www.mathworks.com (Erişim tarihi: 30.09.2011).
- [59] Klein, M.T., A Straightforward Graphical User Interface for Basic and Advanced Signal Processing of Thermographic Infrared Sequences. Termosense 30 (SPIE, Vol. 6939): 1-14, 2008.
- [60] Huang, T.S., G.J.Yang, and G.Y.Tang., A Fast Two-Dimensional Median Filtering Algorithm. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing 27(1): 21-37, 1979.
- [61] Arslan, M., Erişen A., Non-destructive Testing of Damaged Material Using Surface Temperature Distribution Determined by Infrared Thermography and Image Processing Techniques. International Science and Technology Conference (ISTEC), October 2010, Famagusta-TRNC, s. 344-350, 2010.
- [62] Arslan, M., Erişen, A., Kompozit Levhaların Kızılötesi Termografi ve Görüntü İşleme Teknikleri Kullanılarak Tahribatsız Muayenesi. I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu (KOMPEGE), Kasım 2011, İzmir, sf. U12(1-11), 2011.
- [63] Avdelidis, N.P., Castanedo, C., Maldague, X., A Thermographic Comparison Study for the Assessment of Composite Patches. Journal of Infrared Phys. Technology (45): 291-299, 2004.

- [64] Castanedo, C., Gonzalez, D., Klein, M., Pilla, M., Vallerand, S., Maldague, X., Infrared Image Processing and Data Analysis”, *Infrared Physics & Technology* (46): 75–83, 2004.
- [65] Cramer, K., Winfree, W., Hodges, K., Status of thermal NDT of Space Shuttle Materials at NASA. *Proceedings of SPIE Thermosense 28* (6205): 1-9, 2006.
- [66] Vavilov, V., Nesteruk, D., Evaluating Water Content in Aviation Honeycomb Panels by Transient IR Thermography. *Proceedings of SPIE Thermosense 27* (5782): 411–417, 2004.
- [67] Badghaish, A., Fleming, D. C., Nondestructive Inspection of Composite Using Step Heating Thermography. 22nd Technical American Society of Composites Conference, Seattle, WA, s. 323-336, 2007.
- [68] Maldague, X., Applications of Infrared Thermography in Nondestructive Evaluation, *Trends in Optical Nondestructive Testing* (33): 591- 609, 2000.
- [69] Matzkanin, G.A., Yolken, H.T., A Technology Assessment of Probability of Detection for Nondestructive Evaluation. *Nondestructive Testing Information Analysis Center, ABD*, 2001.
- [70] Krapez, J.C., Lock-in Thermography: Advantages and Problems of Some Approaches. *Proc. 3rd Int. Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications, Capri, Italy.*, s. 219-237, 1995.
- [71] Magnani, F.S., Silva, R.N.T., Infrared Thermography Applied to the Quantitative Determination of Spatial and Thermophysical Parameters of Hidden Included Objects. *Applied Thermal Engineering* (27):2378–2384, 2007.
- [72] Bison, P.G., Marinetti, S., Mazzoldi, A., Bressan, C., Cross-Comparison of Thermal Diffusivity Measurements by Thermal Methods. *Infrared Physics & Technology* (43):127-132, 2002.
- [73] Meola, C., A New Approach for Estimation of Defects Detection with Infrared Thermography. *Materials Letters* (61): 747-750, 2007.
- [74] Titman, D.J., Applications of Thermography in Non-Destructive Testing of Structures, *NDT&E International* (34):149–154, 2001.
- [75] Yang, B., Chengliang, W., Thermal Nondestructive Testing Technology of Aircraft Composite Material. *The Ninth International Conference on*

- Electronic Measurement & Instruments (ICEMI'2009), Beijing, China, s. 557-562, 2009.
- [76] Meola, C., Carlomagno, G.M., Giorleo, L., The Use of Infrared Thermography for Materials Characterisation. *Journal of Materials Processing Technology* (155):1132-1137, 2004.
- [77] Sun, J. G., Analysis of Pulsed Thermography Methods for Defect Depth Prediction. *Journal of Heat Transfer* (128): 329-338, 2006.
- [78] Avdelidis, N.P., Almond, D.P., Transient Thermography as a Through Skin Imaging Technique for Aircraft Assembly: Modeling and Experimental Results. *Infrared Physics and Technology* (45): 103–114, 2004.
- [79] Avdelidis, N.P., Gan, T.H., Infrared Thermography as a Non-Destructive Tool for Materials Characterisation and Assessment. *Thermosense: Thermal Infrared Applications* 33 (801313): 1-7, 2011.
- [80] Kruse, P.W., *Uncooled Thermal Imaging. Arrays, Systems and Applications.* SPIE Press, Bellingham, ABD, 2001.
- [81] Servais, P., Development of a New NDT Method Using Thermography for Composite Inspection on Aircraft with Portable Military Thermal Imager. *European Conference on NDT (ECNDT Conference) 2006*, Berlin, s. 1-23, 2006.
- [82] Dougherty, R., Lotufo, R.A., *Hands-on Morphological Image Processing.* SPIE Press, Washington, ABD, 2003.
- [83] Baxes, A. G., *Digital Image Processing Principles and Applications.* John Wiley & Sons Inc., ABD, 1994.
- [84] Castelman, R. K., *Digital Image Processing.* Prentice Hall, New Jersey, ABD, 1996.
- [85] Lim, J. S., *Two-Dimensional Signal and Image Processing.* Prentice Hall, New Jersey, ABD, 1990.

EKLER

EK-1. Flir i50 Kızılötesi Kamera Teknik Özellikler Çizelgesi

Görüntü performansı	
Görüş alanı	25° x 25°
Asgari odak mesafesi	0.12 m
Odaklama	Manuel
Detektör tipi	(FPA) Odaksal düz sıra,soğutmasız mikrobolometre 140 x 140 piksel
Spektral aralık	7.5 ile 13 µm arası
Görüntü sunumu	
Ekran	3.5” renkli LCD, 16K renk
Ölçüm	
Sıcaklık aralığı	-20°C ile +350°C arası
Ölçüm modu	Görüntünün ortasında sabit nokta
Menü kumandaları	Paletler (renkli veya siyah-beyaz)
Otomatik ayarlı	(otomatik/manuel)
Kurulum kumandaları	Gün/zaman, lisan, güç devre dışı, görüntü yoğunluğu
Ölçüm düzeltmeleri	
Emissivite	0.1 ile 1.0 arası değişken
Görüntü saklama	
Tip	Yerleşik FLASH hafıza (50 görüntü)
Dosya formatları	Standart JPEG
Lazer	locatIR
Sınıfı	Sınıf 2
Tip	Yarı iletken AlGaInP diyot lazer: 1mW/635 nm kırmızı
Pil sistemi	
Tip	Li-Ion, şarj edilebilir, sahada değiştirilebilir
Çalışma süresi	7 saatlik sürekli çalışma. Ekranda pilin durumu gösterilir
Şarj etme sistemi	Kamera içinde, AC adaptörü
AC çalışması	AC adaptörü 90-260 V AC, 50/60 Hz
Giriş voltajı	11-16 V DC
Çevre özelliği	
Çalışma sıcaklık aralığı	-15°C ile +50°C arası
Depolama sıcaklık aralığı	-40°C ile +70°C arası

EK-2. Geliştirilen Yazılımdan Örnek MATLAB Kodu

```
% Geliştirilen Yazılımdan Örnek MATLAB Kodu
% IRNDT -> Resimde hasar sayısı ve hasar ile ilgili bilgileri (alan,
konum, vb.) bulma

clc
clear all
close all;
uiopen('C:\IRNDT\876.jpg',1)
G876= rgb2gray(x876);
G10=imadjust(G876);
B876=imextendedmax(G10,20);
imshow(B876)
[L,n]=BWLabel(B876);

% hasar sayısı
Hasar_Sayisi=n
graindata = regionprops(L,'basic');

% Alan
graindata(2).Area;

% Hasarın Merkezi
graindata(2).Centroid;

% Hasarın konumu (To find the smallest possible bounding box )
graindata(2).BoundingBox;

% Hasar bilgilerini tutma
allgrains = [graindata.Area];
```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mevlüt ARSLAN

Doğum Tarihi : 16.03.1979

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu:

Lisans : Erciyes Üniversitesi (Kontrol ve Bilgisayar Mühendisliği) – 2001

Yüksek Lisans : Kırıkkale Üniversitesi (Makina Mühendisliği) - 2005

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl/Yıllar:

Kırıkkale Üniversitesi Bilgisayar Müh. Bölümü / Arş. Gör. 2001-2007

TÜBİTAK BİLGEM UEKAE

İleri Teknoloji Araştırma Enstitüsü (İLTAREN) / Uzman 2007-....

Yayınları:

1. Arslan M. ve Erişen A., Kompozit Levhaların Kızılötesi Termografi ve Görüntü İşleme Teknikleri Kullanılarak Tahribatsız Muayenesi. I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu (KOMPEGE), 17 – 19 Kasım 2011, İzmir, sf. U12(1-11), 2011.
2. Arslan M. ve Erişen A., Non-destructive Testing of Damaged Material Using Surface Temperature Distribution Determined by Infrared Thermography and Image Processing Techniques. International Science and Technology Conference (ISTEC), 27-29 October 2010, Famagusta-TRNC, s. 344-350, 2010.
3. Arslan, M., Atabaş, İ. ve Erişen, A., Web Tabanlı Kontrol Uygulamalarında İnternetin Sistem Performansına Etkisi, Proses Otomasyon D.150, sf. 24-32, 2008.
4. Arslan, M., Atabaş, İ. ve Erişen, A., Web Tabanlı Kontrol Uygulamalarında İnternet Katmanının Sistem Performansına Etkisinin İncelenmesi, Akademik Bilişim Konferansı (AB'07), 31 Ocak-2 Şubat 2007, Kütahya, sf. 63-69, 2007.
5. Arslan, M. ve Birgören, B., Uzaktan Eğitimde Kullanılan İnternet Tabanlı Laboratuar Uygulamalarının Web Arayüzlerinde Kalite Özellikleri, 23.Ulusal Bilişim Kurultayı (Bilişim'06), 7-10 Kasım 2006, Ankara, s. 108-113,2006.
6. Arslan, M., Binalarda Kullanılan Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme (HVAC) Sistemlerine Web Entegrasyonu, Yapı ve Kentte Bilişim 2006 IV.Ulusal Kongresi, 8-9 Haziran 2006, Ankara, s. 89-94, 2006.

7. Arslan M. ve Erişen A., Internet Related Basic Problems and Solution Suggestions in Web-Based Distance Education Laboratories, 6th International Educational Technology Conference (IETC2006), 19-21 April 2006, Famagusta-North Cyprus, Vol I pp. 136-142, 2006.
8. Arslan, M., Atabaş, İ., Erişen, A. ve Uzun, İ., Web Tabanlı Kontrol Uygulamalarında İnternet Kaynaklı Temel Sorunlar ve Çözüm Önerileri, IV. Bilgi Teknolojileri Kongresi - Akademik Bilişim Konferansı (AB'06), 9-11 Şubat 2006, Denizli, s. 349-352, 2006.
9. Arslan, M., İnternet Tabanlı Endüstriyel Sıcaklık Ölçme ve Kontrol Sistemi, 2.Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 23-25 Kasım 2005, İstanbul, s. 124-132, 2005.
10. Arslan, M., Uzaktan Mühendislik Eğitiminde Laboratuvarlar ve Uzaktan Erişimli Termodinamik Laboratuvarı, 22.Ulusal Bilişim Kurultayı (Bilişim'05), 9-11 Kasım 2005, Ankara, s. 108-112, 2005.
11. Arslan M. ve Erişen A., Internet-based Temperature Control System, International Congress on Information Technology in Agriculture, Food and Environment (ITAFE'05), 12-14 October 2005, Adana, Vol I pp. 41-47, 2005.
12. Arslan M. ve Erişen A., Uzaktan Mühendislik Eğitiminde Sanal Laboratuvarlar ve Geliştirilen Uygulamalı Model ile Tasarlanan Uzaktan Erişimli Sanal Laboratuvar Örnekleri: E- Kontrol Lab. ve Uzaktan Erişimli Termodinamik Lab, Fifth International Educational Technology Conference (IETC2005), 21-23 September 2005, Sakarya, Vol II pp. 888-892, 2005.
13. Arslan, M., Atabaş, İ., Erişen, A. ve Uzun, İ., Uzaktan Erişimli Kontrol Laboratuvarı Uygulamaları, Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendislikleri Eğitimi 2. Ulusal Sempozyumu, 25-27 Mayıs 2005, Samsun, s. 114-119, 2005.
14. Arslan, M. ve Atabaş, İ., "e-Kontrol Laboratuvarı", Akademik Bilişim Konferansı (AB'05), 2-4 Şubat 2005, Gaziantep, s. 165-173, 2005.

Araştırma Alanları:

- Kızılötesi Termografi ile Tahribatsız Muayene
- Görüntü İşleme
- Web / İnternet Tabanlı Kontrol Sistemleri
- Uzaktan Eğitimde Laboratuvar Uygulamaları
- Ağ Güvenliği