

**UÇAKLARDA SANDVIÇ KOMPOZİTLERE
UYGULANAN TAHRİBATSIZ
MUAYENE YÖNTEMLERİ**

Haşim KAFALI
Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü
Sivil Havacılık Anabilim Dalı
Temmuz - 2004

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Haşim Kafalı'nın Uçaklarda Sandviç Kompozitlere Uygulanan Tahribatsız Muayene Yöntemleri başlıklı **Sivil Havacılık** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans tezi 16/07/2004 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı - Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Yrd. Doç. Dr. A. Akile TANATMIŞ	
Üye	: Prof. Dr. Hidayet BUĞDAYCI	
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
.....11.08.2004..... tarih ve27/1..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Altuğ İFTAR
Fen Bilimleri Enstitüsü
Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

UÇAKLARDA SANDVIÇ KOMPOZİTLERE UYGULANAN TAHRİBATSIZ MUA YENE YÖNTEMLERİ

HAŞİM KAFALI

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Sivil Havacılık Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. A. Akile TANATMIŞ
2004, 97 sayfa

Bu tezde uçak yapılarında hafiflik ve mukavemet özelliklerinden dolayı tercih edilen sandviç kompozitler ve bu yapılara yaygın olarak uygulanan tahribatsız muayene yöntemleri incelenmiştir. Öncelikli olarak sandviç kompozitler hakkında bilgi verilmiş, uçaklarda kullanıldıkları bölgeler belirtilmiş ve avantaj-dezavantajları vurgulanmıştır.

Çalışmada sandviç kompozitlere yaygın olarak uygulanan tahribatsız muayene yöntemleri olan radyografi, akustik emisyon, termografi ve penetrant sıvı kontrol teknikleri incelenmiş, avantaj ve dezavantajları belirtilerek havacılıktaki uygulama alanlarına örnekler verilmiştir. Her bir tekniğin öncelikli olarak çalışma prensibine değinilmiş ve uygulama prosedürleri anlatılmıştır. Her tekniğin uçaklarda yaygın olarak kullanıldıkları bölgeler belirtilmiş, sandviç kompozitlere uygulamaları şekillerle gösterilmiştir.

Sonuç bölümünde de sandviç kompozitlerin kontrolünde tahribatsız muayene yöntemlerinin önemi vurgulanmıştır. İncelenilen dört tekniğin avantaj ve dezavantajları belirtilmiş ve sandviç kompozitlerde oluşan süreksizliklerin hangi teknikle belirlenebileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uçak, Uçak Bakımı, Sandviç Kompozitler, Petek Yapı,
Tahribatsız Muayene

ABSTRACT**Master of Science Thesis****NONDESTRUCTIVE TESTING of SANDWICH COMPOSITES
in
AIRCRAFT STRUCTURES****HAŞİM KAFALI****Anadolu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Aviation Program****Supervisor: Asst. Prof. Dr. A. Akile TANATMIŞ
2004, 97 pages**

This thesis, investigates major nondestructive testing methods applying on sandwich composites, which are preferred due to their light-weight and high-strength advantages in aircraft structures. First, a brief insight about sandwich composites and their use in aircraft is given and their advantages-disadvantages are discussed.

In the study, the following nondestructive testing methods have been investigated: Radiography, acoustic emission, thermography and liquid penetrant inspection. In their use, advantageous and disadvantageous points of these methods are analyzed in detail, and examples regarding their use in aviation applications are given. Working principles and application procedures of each technique are described with figures.

In conclusion, the importance of nondestructive testing methods in sandwich composites is emphasized. Advantages and disadvantages of these four methods are described. Based on this analysis, it is shown that which method can be used in determination of discontinuities occurring in sandwich composites.

**Keywords: Aircraft, Aircraft Maintenance, Sandwich Composites, Honeycomp
Structure, Nondestructive Testing**

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında yardımlarından dolayı tez danışmanım Yard. Doç. Dr. A. Akile TANATMIŞ'a teŐekkürü bir borç bilirim.

ÇalıŐmam boyunca bana her türlü desteği veren ve en az benim kadar bu çalıŐmaya emek sarf eden babam Niyazi KAFALI, annem Dursen KAFALI ve kardeŐim Emine KAFALI' ya sonsuz teŐekkürler.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELE DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. SANDVIÇ KOMPOZİTLER	3
2.1. Çekirdek Malzemeleri	8
2.1.1 Bal peteği/petek çekirdek (Honeycomb)	8
2.1.2. Köpükler	13
2.1.3. Ahşap çekirdekler	16
2.2. Yüzey Malzemeleri ve Özellikleri.....	16
2.3. Yapıştırıcılar ve Özellikleri	16
2.4. Sandviç Kompozitlerin Avantaj ve Dezavantajları	19
2.4.1. Sandviç Kompozitlerin Avantajları.....	19
2.4.2. Sandviç kompozitlerin dezavantajları	19
3. RADYOGRAFİ TEKNİĞİ	21
3.1. Radyografi Yönteminin Temel Prensipleri.....	21
3.1.1. X- Işınları.....	22
3.1.2. Gamma ışınları	24
3.1.3. Nötron radyografisi	26
3.2. Görüntü Ekranlarının Kullanımı.....	26

3.3. Röntgen Filminin Kalitesi	27
3.4. X-ışını Kırılması...	29
3.5. Filmsiz Teknikler (Oskopiler)	31
3.6. Bilgisayar Destekli Radyografi	32
3.7. Radyografi Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	32
3.8. Uçaklarda Radyografi Tekniğinin Sandviç Kompozitlere Uygulanması.....	33
4. AKUSTİK EMİSYON TEKNİĞİ.....	39
4.1. Akustik Emisyonun Temel Prensipleri	39
4.1.1. Malzeme boyutu	42
4.1.1.1. Kaiser etkisi / Uygunluk etkisi	44
4.1.2. Bozulma mekanizmaları	45
4.1.3. Akustik boyutu	46
4.1.4. Sensör boyutu	47
4.1.5. Sinyal oluşturma (Analog/ sürekli).....	49
4.1.6. Sinyal oluşturma (dijital).....	50
4.2. Değerlerin Kaydedilmesi	52
4.3. Akustik Emisyon Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	53
4.4. Ultrasonik Kontrol Yöntemi.....	54
4.4.1. Darbe yankı sistemi	55
4.4.2. Doğrudan iletim sistemi	55
4.4.3. Ultrasonik kontrol yönteminin avantaj ve dezavantajları.....	56
4.5. Uçaklarda Akustik Emisyon ve Ultrasonik Kontrol.....	57

5. TERMOGRAFI	59
5.1. Termografi Yönteminin Temel Prensibi.....	59
5.2. Pasif ve Aktif Termografi.....	60
5.2.1. Pasif termografi	61
5.2.2. Aktif termografi.....	62
5.2.2.1. Darbe termografisi	62
5.2.2.2. Kademe ısıtması (uzun darbe)	64
5.2.2.3. Lockin termografi	64
5.2.2.4. Vibrotermografi (titreşim termografisi)	67
5.3. Termografi Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	68
5.4. Uçaklarda Termografi Tekniğinin Sandviç Kompozitlere Uygulaması.....	69
6. PENETRANT SIVI KONTROL YÖNTEMİ	74
6.1. Penetrant Sıvı Muayene Yönteminin Temel Prensibi	74
6.2. Penetrant Sıvı Kontrol Yöntemi ile Tespit Edilebilen Süreksizlikler.....	75
6.3. Penetrant Sıvı Yönteminin Uygulanışı	76
6.3.1. Yüzey hazırlama	76
6.3.2. Penetrant boya tatbiki	79
6.3.3. Penetrant tipleri.....	81
6.3.3.1. Floresan penetrant (Tip 1).....	81
6.3.3.2. Görünür penetrant (Tip 2)	81
6.3.3.3. Çift duyarlı penetrant (Tip 3).....	81
6.3.4. Penetrant sıvının uygulama teknikleri.....	81
6.3.5. Nüfuziyet zamanı.....	83
6.3.6. Uygulama ısısı	83
6.4. Fazla Penetrantın Giderilmesi	84
6.4.1. Su ile yıkanabilir penetrant.....	85
6.4.2. Sonradan seyreltilen penetrant	85
6.4.3. Çözücü ile temizlenen penetrant.....	86
6.5. Geliştirici (developer) Uygulaması	86

6.5.1. Geliştirici tipleri.....	87
6.5.2. Geliştirici zamanı.....	88
6.6. Kontrol İşlemi.	88
6.7. Son Temizleme.....	89
6.8. Penetrant sıvı Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	90
6.9. Uçaklarda Penetrant Sıvı Kontrol Tekniğinin Sandviç Kompozitlere Uygulanması.....	90
7. SONUÇ	92
KAYNAKLAR.....	95

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
2.1. Günümüzün modern uçaklarında genel olarak sandviç kompozitlerin kullanıldığı bölgelere bir örnek	5
2.2. Günümüzün modern uçaklarında genel olarak sandviç kompozitlerin kullanıldığı bölgelere bir örnek	6
2.3. Sea King Westland helikopterinin palası üzerinde sandviç kompozit kullanımı.....	9
2.4. Uçak üzerinde kullanılan farklı tip petek örnekleri. (a) Taban ve döşemeler, (b) Kontrol yüzeyleri ve firar kenarları, (c) Kanatlar.....	10
2.5. Petek yapının diğer kırışlerden mukavemetli ve sert olduğunun gösterilmesi.....	11
2.6. Hücresel yapıli çekirdekle yüzeyleri belirten tipik bir petek yapı.....	12
2.7. Airbus 310 uçağının istikamet dümeni üzerinde kullanılan nomex yapı	12
2.8. Sandviç yapıların mukavemet-ağırlık oranı avantajının gösterilmesi	13
2.9. Pal kökü ve gövdesinde poliüretan köpük kullanımı	15
3.1. Radyografik işlemin prensibinin gösterimi	22
3.2. X-ışını tüpünün şematik gösterimi	23
3.3. Genişletme (büyütme) derecesi	28
3.4. Geometrik bulanıklığın gösterimi.....	28
3.5. İki atomsal düzlemden yansımış iki paralel x-ışını demeti	30
3.6. X-ışını yansımalarının ölçülmesinin şematik gösterimi.....	30
3.7. Boeing 737-800 tipi uçağının flap ucunda bulunan petek yapıya radyografi yönteminin uygulanması.....	33

3.8. Boeing 737-800 tipi uçağının flap ucunda bulunan petek yapıya radyasyon demetinin açılı gelmesi ile oluşan radyografi görüntüsü	34
3.9. Boeing 737-800 tipi uçağının flap ucunda bulunan petek yapıya radyasyon demetinin paralel gelmesi ile oluşan radyografi görüntüsü	34
3.10. Boeing 737-800 tipi uçağının istikamet dümeninde petek yapıya radyografi yönteminin uygulanması.....	35
3.11. Boeing 737-800 tipi uçağının istikamet dümeninde petek yapıya radyografi yönteminin uygulanması ile ortaya çıkan yüzey çatlakları.....	36
3.12. Boeing 737-800 tipi uçağının istikamet dümeninde petek yapıya radyografi yönteminin uygulanması ile ortaya çıkan yüzey çekirdek ayrılması	36
3.13. Boeing 737-800 tipi uçağının kanatçığı üzerinde bulunan petek yapıya radyografi yönteminin uygulanması	37
3.14. Boeing 737-800 tipi uçağının kanatçığı üzerinde bulunan petek yapıya radyografi yönteminin uygulanması	38
4.1. Akustik emisyonun tarama ve analizinin genel gösterimi.....	41
4.2. Akustik emisyon faaliyetinin gösterimi (a) Sünek malzemeler için (b) Gevrek malzemeler için.....	43
4.3. Akustik emisyon faaliyetinin gösterimi (a) Sünek malzemeler için (b) Gevrek malzemeler için.....	44
4.4. Bölünme faaliyetinin gösterimi	46
4.5. Ultrasonik test düzeneği	56
4.6. Ultrasonik kontrol tekniği ile Boeing 737 uçağının flabında bulunan sandviç kompozit yapının kontrolü	57
4.7. Ultrasonik kontrol tekniği ile Boeing 737 uçağının flabında bulunan sandviç kompozit yapı içindeki suyun tespiti.....	58
4.8. Ultrasonik kontrol tekniği ile Boeing 737 uçağının flabında bulunan sandviç kompozit yapı içindeki suyun tespiti.....	58

5.1. Aktif termografi düzeneği	61
5.2. Basit bir Lock-in termografi düzeneği	66
5.3. Petek yapı içindeki suyun termografi yöntemiyle tespiti	70
5.4. Alüminyum uçak kaplamasındaki perçin deliklerinin termografi yöntemiyle kontrolü.....	70
5.5. Boeing 737-800 tipi uçağının firar kenarı flabının uç kısmında bulunan petek yapıya termografi yönteminin uygulanması	71
5.6. Boeing 737-800 tipi uçağının firar kenarı flabının uç kısmında bulunan bal peteği yapı içindeki suyun termografi yöntemiyle tespiti	72
5.7. Boeing 737-800 tipi uçağının irtifa dümeni üzerindeki petek yapıdaki bağlantı	73
6.1. Boyalı yüzeye penetrant uygulaması.....	76
6.2. Yıkama sonrası test parçası	77
6.3. Penetrant uygulaması.....	80
6.4. Penetrant uygulama teknikleri	82
6.5. Aşırı yıkama	85
6.6. Süreksizlik Belirtisi	86
6.7. Geliştirici uygulama yöntemleri	88
6.8. Boeing 737-800 tipi uçağının kanat kaplaması üzerinde oluşan hasarın sıvı penetrant yöntemiyle tespiti	91
6.9. Boeing 737-800 tipi uçağının kanatçığı üzerinde oluşan hasarın sıvı penetrant yöntemiyle tespiti	91

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
2.1. Boeing uçaklarında sandviç kompozitlerin kullanımındaki artışın gösterilmesi.....	4
7.1. Sandviç kompozitlere yaygın olarak uygulanan tahribatsız muayene yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları.....	93
7.2. Sandviç kompozitlerde oluşan süreksizlikler ve tespit edilebildikleri tahribatsız muayene yöntemleri.....	94

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simge	Açıklama
B	Atomlar Arası Boşluk
c	Işık Hızı (km/s)
C(Rod)	Boylamasına dalga hızı (m/s)
c_p	Isı kapasitesi (kJ/kg °C)
CRT	Cathode ray tube (katot ışın tüpü)
D_0	Kaynak cisim arası mesafe (mm)
D_1	Kaynak film tabakası arası mesafe (mm)
dB	Ses şiddeti (decibel)
D_o	Cisimle radyasyon kaynağı arası mesafe
E	Young modülü
eV	Elektron volt
F	Atomlar arası Boşluk
F	Radyasyon kaynağı genişliği (mm)
h	Plank sabiti
Hz	Herz
J	Enerji (Joule)
K	Isı öz iletkenliği (kW/m°C)
K_{1C}	Kırılma sertliği test numunesi
L	Kaplama Kalınlığı (mm)
L	Nokta kaynağı
Pa	Basınç (Pascal)
S_0	Cisim uzunluğu (mm)
S_1	Cismin gölgesinin uzunluğu (mm)
S_1, S_2	Faz görüntüsü
S_3, S_4	“ “

Simge	Açıklama
t	Zaman (saniye)
t	Cisimle film arası mesafe
t_c	Termal geçiş süresi (s)
U_g	Geometrik bulanıklık
V	Gerilim (Volt)
V_{max}	Maksimum voltaj (volt)
w	Modülasyon frekansı
α	Termal yayılabilirlik ($kW/m^{\circ}C$)
ϵ	Şekil değişimi uzama (mm)
λ	Dalga boyu (nanometre)
μ	Derinlik (mm)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
φ	Termografi görüntüsü
α	Açı birimi (derece $^{\circ}$)

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler optimum ağırlık, korozyon direnci, yorulma mukavemeti gibi özellikler temin edebilmek için iki yada daha fazla malzemenin fiziksel olarak bir araya getirilmesi ile elde edilirler. Kompozitler genellikle fiber, partikül şeklindeki bir takviye malzemesi ile organik, metal yada seramik esaslı bir matristen meydana gelmektedir. Düşük özgül ağırlıklarının yanı sıra sağlamlıkları, düşük ısıl iletkenlikleri ve yüksek ısıl mukavemetleri nedeni ile kompozit malzemeler askeri ve sivil tüm uçak ve benzeri hava araçlarında ve hatta birçok endüstriyel uygulamada büyük bir kullanım alanına sahiptirler. Uçak yapılarında yaygın kullanım alanları yüzey kaplamaları, lonjeronlar, takviyeler, uçuş kumanda yüzeyleri, iniş takımı kapakları, pervane palaları ve radar anten muhafazalarıdır [1].

Kompozit malzemelerin hafiflik ve mukavemet açılarından avantajlı olmalarına karşılık, nem absorpsiyonu, kırılma ve genelde üretim maliyetinin yüksek olması gibi birtakım sorunları da vardır. Ancak, son yıllarda kompozit üretim teknolojisindeki ilerlemeler sonucunda kompozit konstrüksiyon konvansiyonel yapıdan daha ucuz olmaya başlamıştır [1].

Kompozit yapılar tabakalı kompozitler ve sandviç kompozitler olmak üzere iki şekilde imal edilebilmektedirler [2]. Özellikle hava araçlarının yapılarında malzeme kalınlığı artarken, ağırlığın da artması problemi genellikle sandviç konstrüksiyon kullanılarak giderilmeye çalışılır [3].

Ancak sandviç yapılı kompozitlerin özelliklerindeki farklılıklar ve sandviç yapılarının üretim usullerinin karmaşıklığından dolayı, bunların yapısal bütünlüğü hakkında bilgi edinebilmek için bazı kontrol tekniklerinin bulunması gerekmektedir. Bu ihtiyacı gerek programlı ve gerekse programsız bakımlarda sağladıkları üstünlükler nedeni ile tahribatsız muayene yöntemleri karşılamaktadır.

Bu çalışmada öncelikli olarak sandviç kompozitler incelenmiştir. Sandviç kompozitlerin yapısal elemanları olan çekirdekler, yüzey malzemeleri ve yapıştırıcılar hakkında ve bunların havacılıktaki uygulamaları konusunda bilgi

verilmiştir. Sandviç kompozitlerin uçaklar üzerinde kullanıldığı bölgeler gösterilerek avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir. Daha sonraki bölümlerde ise uçaklarda kullanılan sandviç kompozitlere yaygın olarak uygulanan tahribatsız muayene yöntemleri dört grupta incelenmiştir. Bunlar havacılıkta yaygın bir kullanım alanı bulunan radyografi yöntemi, akustik emisyon tekniği, yeni bir teknik olan ve uygulama alanları her geçen gün artan termografi yöntemi, penetrant sıvı kontrol yöntemidir. İncelenen tekniklerin avantaj ve dezavantajları belirtilerek uçaklardaki uygulama alanları ile ilgili örnekler verilmiştir.

Sonuç olarak çalışmada günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte uçaklarda bakım maliyetlerinin azaltılması ve bakım sürelerinin istenilen aralıklarda tutulabilmesi için vazgeçilmez olan tahribatsız muayene yöntemlerinin ne kadar önemli olduğu vurgulanmaktadır.

2. SANDVIÇ KOMPOZİTLER

Eski uçaklarda yüzey kaplamaları genellikle hava sızdırmaması, kötü hava koşullarına ve güneş ışığına dayanması için değişik cila ve macunlarla işlenen ve İrlanda Keteni olarak bilinen bir bezden yapılırdı. Bu tip kaplamalar üzerlerindeki hava akımına bağlı olarak oluşan hava basıncına karşı dayanıklıdır. Fakat bunların iç yapının mukavemetine herhangi bir katkısı söz konusu değildir [4].

Gün geçtikçe uçakların daha hızlı ve daha büyük yapılmaları nedeni ile bez kaplamalar yerlerini önce çok katlı ağaca (kontraplak) ve daha sonra da ince metal saçlara bırakmıştır.

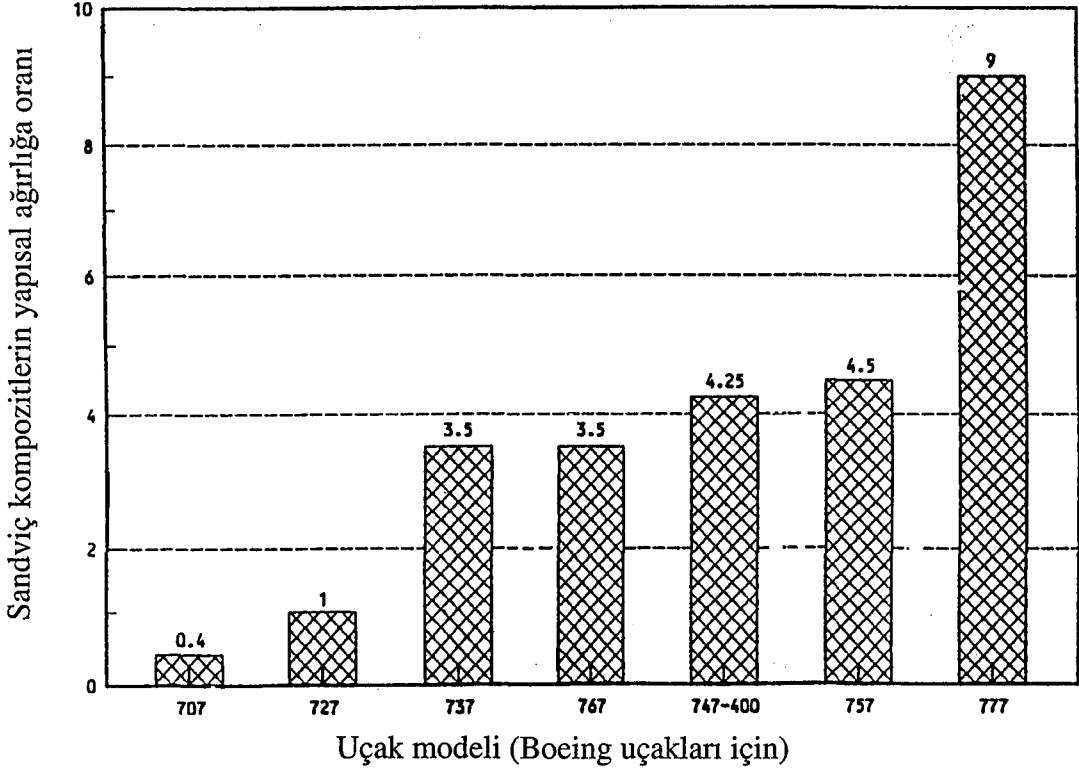
Metal kaplamalar yapının mukavemetine de katkıda bulunmakta ve bazen de bütün yükleri karşılayabilmektedirler. Uçak yapısına etki eden yükler önce kaplamalara gelmekte ve daha sonra takviyelere ve lonjeronlara iletilmektedirler. Bu nedenle metal kaplamalar yeterince mukavemet verecek kalınlıkta olmalıdır. Ancak malzeme kalınlığı artarken, ağırlığın da artması önemli bir problemdir.

İstenilen mukavemet özellikleri ile malzeme kalınlığının azaltılması sandviç konstrüksiyon ile sağlanabilmektedir. Örneğin köpükle takviye edilmiş 0.7 mm'lik bir alüminyum saç ile 1.22 mm'lik bir alüminyum sacın mukavemeti elde edilmektedir [5].

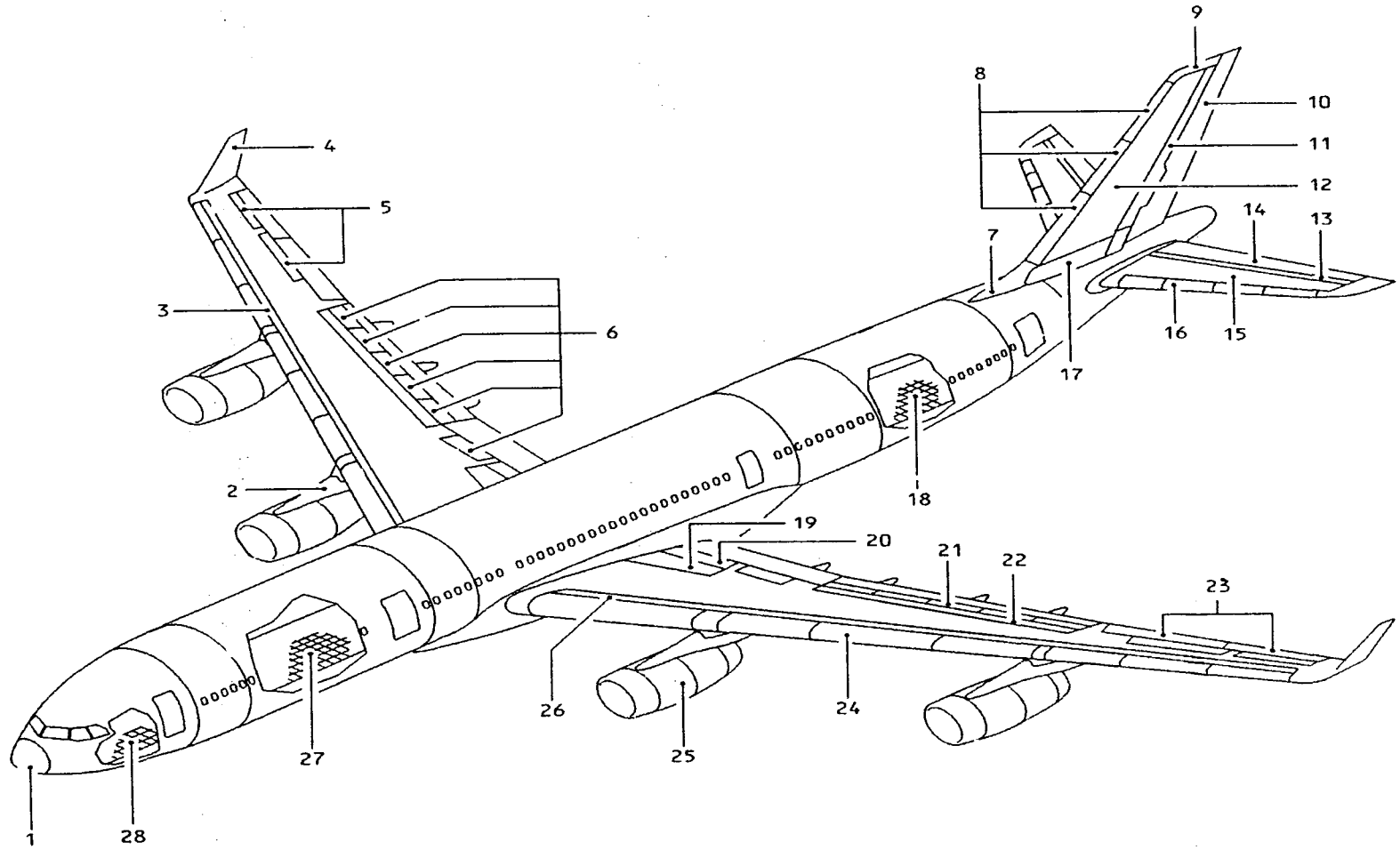
Sandviç konstrüksiyon daha yüksek yoğunluklu, ince metal ya da takviyeli reçineden yapılan iki yüzey arasına düşük yoğunluklu çekirdek malzemesi yapıştırılarak üretilir. Sandviç kompozitlerin en önemli özelliği yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip malzemeler olmalarıdır [2]. Darbelere dayanıklı olması, titreşim ve akustik-termal izolasyon kalitesinin yüksek olması ve korozyon direncinin yüksek olması da bu konstrüksiyonun tercih edilme nedenleri arasındadır [2,3]. Bu yüzden sandviç konstrüksiyon atölye yapımı uçaklardan yüksek hızlı uçaklara kadar askeri ve sivil tüm hava araçlarında uygun bölgelerde kullanılmaktadır [6].

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte her geçen gün uçak yapılarında kullanılan sandviç kompozitlerin oranı artmaktadır. Çizelge 2.1 uçak tiplerine göre sandviç kompozit malzeme kullanımının ne kadar arttığını göstermektedir [7].

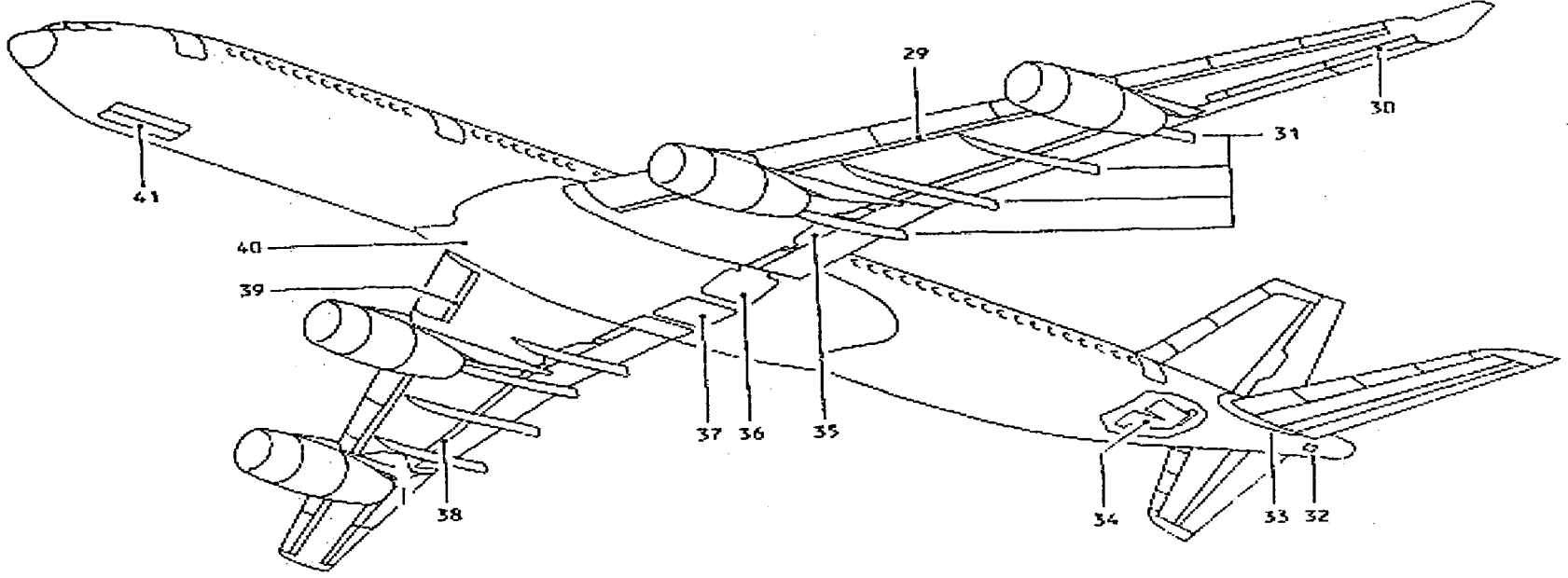
Çizelge 2.1. Boeing uçaklarında sandviç kompozitlerin kullanımındaki artışın gösterilmesi [7]



Şekil 2.1 ve şekil 2.2’de ise günümüzün modern uçaklarında genel olarak sandviç kompozitlerin kullanıldığı bölgeler verilmektedir [7].



Şekil 2.1. Günümüzün modern uçaklarında genel olarak sandviç kompozitlerin kullanıldığı bölgelere bir örnek [7]



Şekil 2.2. Günümüzün modern uçaklarında genel olarak sandviç kompozitlerin kullanıldığı bölgelere bir örnek [7]

Şekil 2.1 ve şekil 2.2'deki rakamlar şunları ifade etmektedir [7]:

- 1- Burun konisi
- 2- Motor askıları
- 3- Hücüm kenarı panelleri
- 4- Kanat ucu plakaları (winglet)
- 5- Firar kenarı panelleri
- 6- Hava freni
- 7- Sırt kanatçığı
- 8- Dikey stabilize hücüm kenarı
- 9- Dikey stabilize tepe noktası
- 10- İstikamet dümeni
- 11- Dikey stabilize firar kenarı
- 12- Dikey stabilize gövdesi
- 13- İrtifa dümeni firar kenarı
- 14- İrtifa dümeni
- 15- Yatay stabilize gövdesi
- 16- Yatay stabilize firar kenarı
- 17- Aerodinamik kaportalar (fairings)
- 18- Kabin ve kargo kompartımanı döşemeleri
- 19- Kanat üzeri paneli
- 20- İtici kutusu
- 21- Dış flap
- 22- Firar kenarı panelleri
- 23- Kanatçık
- 24- Hücüm kenarı
- 25- Motor kaportaları (kanat altı kaporta)
- 26- İç hücüm kenarları
- 27- Kabin ve kargo kompartımanı taban döşemeleri
- 28- Kokpit ve aviyonik kompartımanı taban döşemeleri
- 29- Dış hücüm kenarı kontrol panelleri
- 30- Dış firar kenarı kontrol panelleri
- 31- Flap aerodinamik hava yönlendirici kaportaları

- 32- Aksesuar kompartımanı kontrol panelleri
- 33- Kaporta (apron)
- 34- Bakım panelleri
- 35- İ firar kenarı kontrol panelleri
- 36- Ana iniş takım kapakları
- 37- Merkezi fren kapakları
- 38- Orta firar kenarı kontrol panelleri
- 39- İ hücum kenarı kontrol panelleri
- 40- Gövde aerodinamik kaportası
- 41- Burun tekerleği kapakları

2.1. Çekirdek Malzemeleri

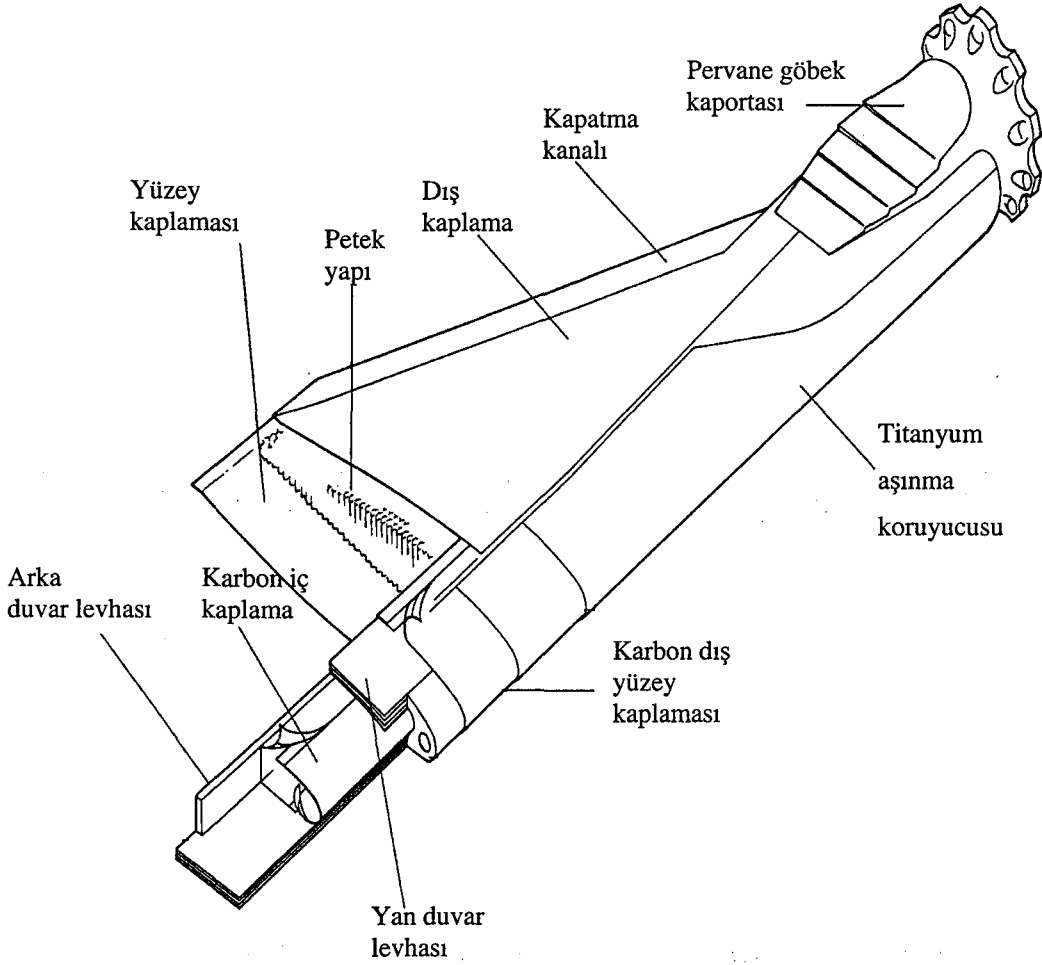
İki ince levha arasına yapıştırılan çekirdek malzemesi rijit ve düşük ağırlıklı bir yapı oluşturur. Çekirdek malzemesi yapıya büyük bir basma mukavemeti de vermektedir. Örneğin bir rotor palası üzerindeki metal levha uçuş sırasında etki eden gerilmeler nedeni ile esneme eğilimine sahiptir. Bu da metal yorulmasına neden olur. Köpük yada petek bir çekirdeğe sahip kompozit bir palada yüzeyin esnemesi büyük oranda ortadan kalkmıştır [8].

Sandviç konstrüksiyonda çeşitli çekirdek formları kullanılır. Bunlar petek çekirdek, köpük ve ahşap çekirdeklerdir [8].

2.1.1. Bal peteği/petek ekirdek (Honeycomb)

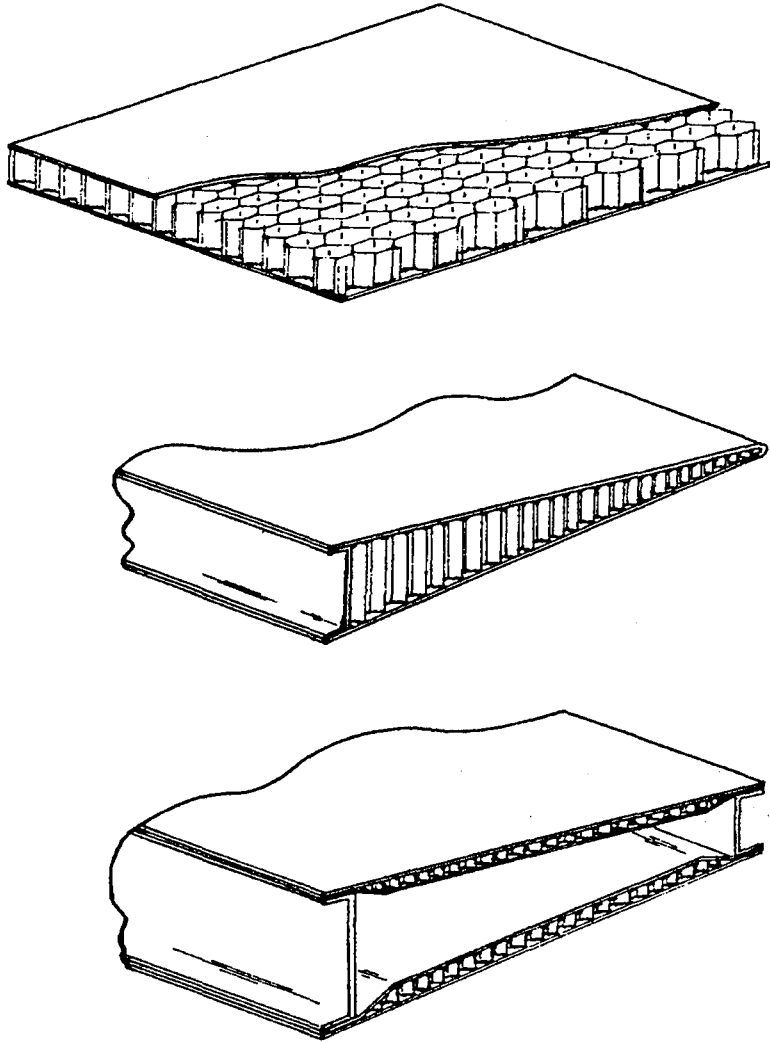
Hafif uçak konstrüksiyonundaki uygulamaların çoğunda köpük çekirdek yer alırken, petek yapılar yüksek performanslı uygulamaların çoğunda sandviç çekirdeği olarak kullanılırlar [6,8]. Bu tip çekirdek yapısı doğal bal peteğinin biçimindedir (altıgen) ve çok yüksek bir mukavemet/ağırlık oranına sahiptir. Bu nedenle uçak ve helikopterlerin taban ve duvar panellerinde, kaplamalarında, kompleks şekilli kontrol yüzeylerinde ve hatta bazı helikopterlerin rotor palalarında da petek yapılar kullanılmaktadırlar [8,9].

Şekil2.3'de helikopter palası üzerinde bulunan sandviç kompozit yapı gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Sea King Westland helikopterinin palası üzerinde sandviç kompozit kullanımı [9]

Uçak petek malzemeleri genellikle sabit veya değişken kalınlıkta imal edilirler [10]. Şekil 2.4'de uçaklar üzerinde kullanılan farklı tip petek yapı örnekleri verilmiştir.



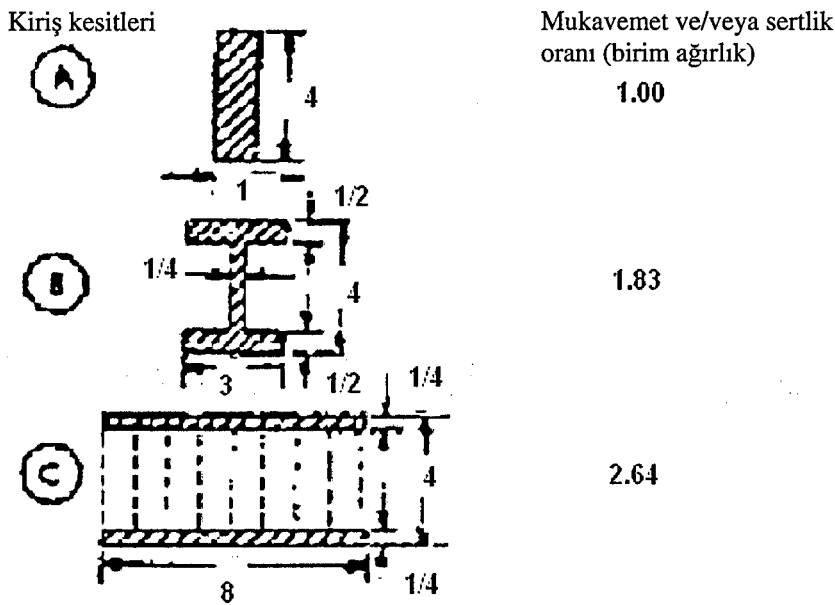
Şekil 2.4. Uçak üzerinde kullanılan farklı tip petek örnekleri. (a) Taban ve döşemeler, (b) Kontrol yüzeyleri ve firar kenarları, (c) Kanatlar [10]

Petek yapı, kıvrılmış şeritlerden oluşan çekirdek malzemesinin birleştirilmesi ile oluşturulur. Şeridin yönü peteğin bir kenarından yırtarak bulunabilir. Yırtığın yönü şeridin yönüne paralel olur. Petek, şerit yönü dışında yırtılmayacaktır. Onarım yapılırken yenilenen şerit yönünün orijinal parçanın şerit yönünde olması gerekir [8].

Petek köpük yapıştırıcı ile tutturulabilir. Köpük yapıştırıcı birleştirilecek bölümler arasına yayılır. Yapıştırma işlemi esnasında köpük petek çekirdeğin boşlukları içine yayılır. Bunun için ısıtılarak kurutulan köpük bir yapıştırıcı

boşlukları içine yayılır. Bunun için ısıtılarak kurutulan köpük bir yapıştırıcı kullanılır [8]. Petek çekirdek malzemesi normalde kalınlık yönünde peteklere dikey yönde etki eden basma gerilmeleri etkisinde kalır. Bu nedenle dikey yönde yeterince dayanıklı olmalıdır. Çekirdek, genişlik yönünde çok az mukavemete sahiptir [6].

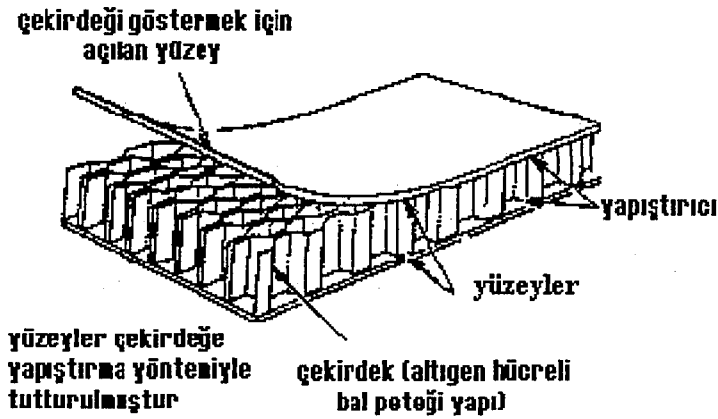
Şekil 2.5’de gösterildiği gibi, eşit ağırlığa, eşit kalınlığa sahip ve aynı malzemedan yapılmış kirişler için, petek en iyi (en verimli) yük taşıyan konfigürasyondur [2].



Şekil 2.5. Petek yapının diğer kirişlerden mukavemetli ve sert olduğunun gösterilmesi

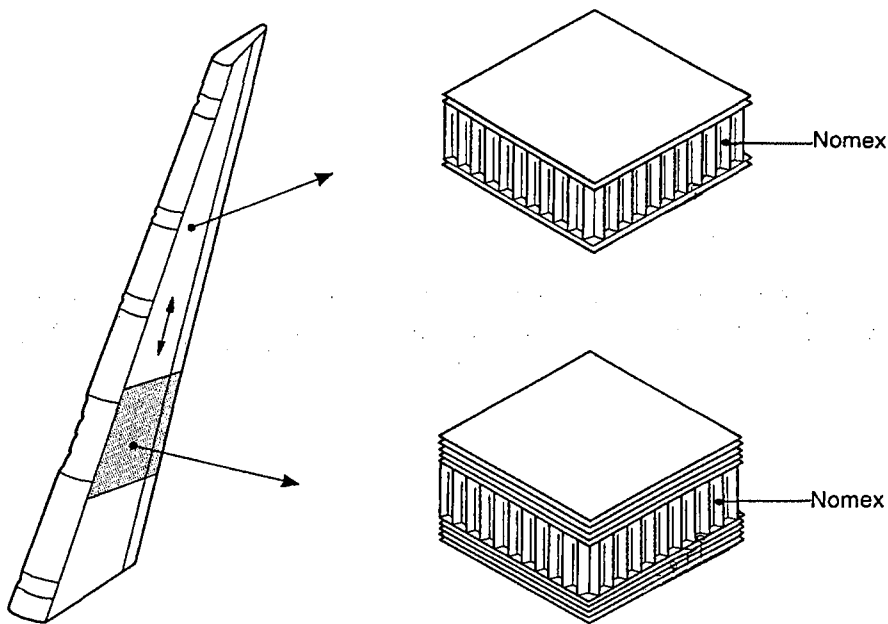
[2]

Şekil 2.6 ise bir petek kirişin yapısını göstermektedir. Yüzeyler küçük hücre katlarıyla desteklendikleri için eğilmezler. Belirli bir uygulama için olası gereksinimleri karşılamak için çekirdek hücre boyutları ve malzeme değiştirilerek farklı mukavemet özellikleri elde edilebilir.



Şekil 2.6. Hüresel yapı çekirdekle yüzeyleri belirten tipik bir petek yapı [2]

Uçak yapısal uygulamalarında çekirdek alüminyum, fiberglass, kağıt, Nomex, Korex veya çelik malzemelerden yapılabilir [6,8,9,11]. Nomex, Dupont tarafından üretilen ve gelişmiş kompozit çekirdek malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılan ticari bir markadır [8]. Yine Dupont tarafından üretilen Korex de aramid/phenolic esaslı ve yüksek mukavemet özelliklerine sahip bir diğer çekirdek malzemesidir. İniş takımı kapaklarında ve kuyruk takımında kullanılmaktadır [11]. Şekil 2.7'de Airbus 310 uçağının istikamet dümeni üzerinde kullanılan nomex çekirdek görülmektedir [9].



Şekil 2.7. Airbus 310 uçağının istikamet dümeni üzerinde kullanılan nomex yapı [9]

Yapısal rijitliği temin etmek amacı ile bazı uygulamalarda alüminyum alaşımlı çekirdek malzemesi kullanılmaktadır. Çekirdek, petekli bir yapı formu verilen alüminyum folyodan yapılmaktadır [8].

2.1.2. Köpükler

Uygulamalara bağlı olarak kullanılan birçok değişik tipte köpük vardır. Yüksek sıcaklık köpükleri, ateşe dayanıklı köpükler, onarım köpükleri, yapısal köpükler gibi farklı yoğunluklarda ve tiplerde köpükler bulunmaktadır. Köpükler onarım için kullanılacaklarında uygun tipin, uygun yoğunlukta kullanılması önemlidir [8].

Şekil 2.8’de dört katmanlı katı fiberglass tabakanın, dört kat daha fazla kalınlıktaki köpük çekirdekli sandviç yapı ile karşılaştırılması ve sandviç yapının avantajları görülebilir. Köpüğün üzerinde iki kat fiberglass ve altında da iki kat fiberglass tabaka bulunmaktadır.



çekirdeksiz 4 kat fiberglass



**37 kat sert
10 kat dayanıklı
%6 daha ağır**

mukavemet çekirdek kalınlığı ile artmaktadır

Şekil 2.8. Sandviç yapıların mukavemet-ağırlık oranı avantajının gösterilmesi [8]

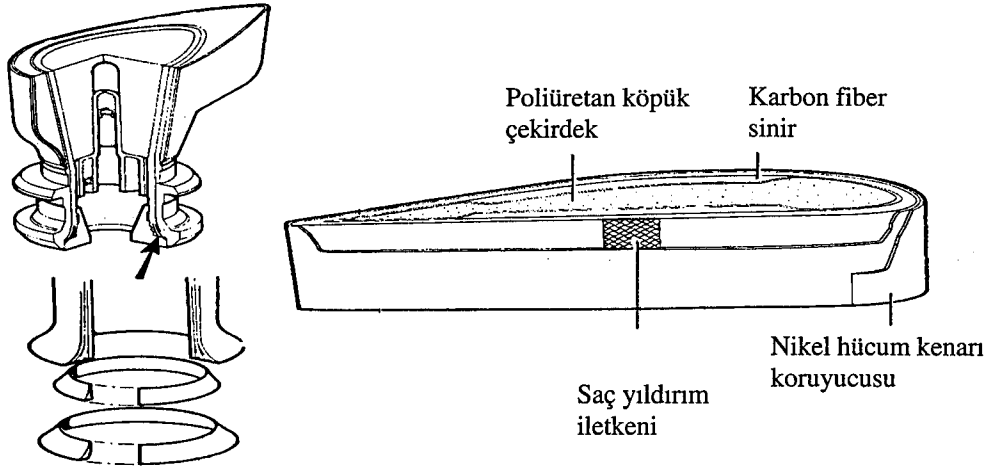
Burada sadece yüzde 6'lık bir ağırlık artışı ile birlikte 37 kez daha sert ve 10 kat daha dayanıklı bir yapı elde edilmiştir. Bu ilave ağırlık, köpük çekirdek kullanımı ile kazanılan mukavemet ve sertlik miktarı ile karşılaştırıldığında çok fazla bir miktar oluşturmamaktadır [8,9].

Son zamanlarda yüksek yoğunluklu ve yüksek kaliteli hücresel köpüklerin gelişmesi sandviç yapıların kullanımında oldukça etkili olmuştur. Hücresel köpükler petekler kadar yüksek sertlik ve mukavemet-ağırlık oranına sahip değillerdir. Öncelikli olarak hücresel köpükler peteklere nazaran daha ucuzdurlar; fakat daha da önemlisi makroskobik seviyede katıdırlar. Bu da sandviç elementlerinin üretimini kolaylaştırır. Köpük yüzeyi birleştirme için uygundur. Yüzey hazırlama ve şekil verme kolaydır. Çekirdek bloklarının bağlantıları yapıştırma yoluyla kolaylıkla gerçekleştirilir. Köpükler yüksek termal izolasyon ve akustik izolasyon özelliklerine sahiptirler. Çoğu köpüğün sıkı bir hücre yapısına sahip olması su nüfuziyetinin bir sorun olmaktan çıkmasına da neden olmaktadır.

Uçaklarda köpükler kanat yapısı içinde, kargo ve iniş takımı kapaklarında, hava frenlerinde, ana iniş takımı dikmesi kaportasında, motor kaportası ve kapaklarında kullanılmaktadır. Düşük maliyetli olmaları, düşük ağırlığa sahip olmaları, mükemmel termal yalıtıma sahip olmaları, basma dayanımlarının yüksek olması, nem oluşumunu engellemeleri, korozyon dirençlerinin yüksek olması gibi nedenlerden dolayı havacılık ve uzay endüstrilerinde köpükler yaygın olarak kullanılmaktadırlar [12]. Bu amaçla çok çeşitli köpükler kullanılmaktadır:

1. Poliüretan köpük

Poliüretan köpükler çok veya az açık hücreli hafif köpüklerden, sabit tipli sıkı hücreli tiplere kadar birçok değişik tipte üretilirler ve yoğunlukları 30 ila 500 kg/m³ arasında değişiklik gösterir. Şekik 2.9'da pal kökü ve gövdesinde poliüretan köpük kullanımı verilmiştir [9].



Şekil 2.9. Pal kökü ve gövdesinde poliüretan köpük kullanımı [9]

2. PVC köpük (Polyvinylchloride foam)

PVC köpük hem polyester hemde epoksi reçine ile kullanılabilir. Kızgın tel kesici ile kesilebilirler.

3. Suni köpük (Plastik mantar)

Suni-köpük genel olarak atölye yapımı (home-build) uçaklarda kullanılır ve sadece epoksi reçine ile birlikte kullanılmalıdır. Polyester reçine suni köpüğü çözüdürebilir. Uçaklarda kullanılan kaliteli ve sağlam köpükle, kaplar için kullanılan suni köpükler karıştırılmamalıdır.

İstenilen şekli verebilmek için suni köpük bir kızgın tel kesicisi ile kesilebilir. Bu alet atölye yapımı uçakları yaparken kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Kesilecek olan köpüğün her iki yüzüne de bir şablon yerleştirilir. Daha sonra tel ısıtılır ve şablon etrafından geçirilir. Düzgün kavisletilmiş yüzeyler kızgın tel kesicisi ile elde edilebilir[8].

4. Üretan

Bu tip köpük hem epoksi hem de polyester reçine ile birlikte kullanılabilir. Üretan, suni köpüğün kesildiği kızgın tel kesicisi ile kesilemez. Çünkü üretan yüksek sıcaklığa maruz kaldığında zararlı bir gaz ortaya çıkmaktadır. Üretan, kızgın tel kesici kullanımı yerine yaygın kesici aletler kullanılarak kesilebilir.

Örneğin bıçaklar, daha sonra zımparalanarak istenilen ölçü ve şekle sokulabilecek kaba şekilleri elde etmek için kullanılabilirler [8,9,12].

5. Hücreli köpük (strux, selüloz asetat)

Hücreli köpük malzeme, sinir ve diğer yapısal destekleri imal etmek için kullanılır.

2.1.3. Ahşap çekirdekler

Balsa ağacı veya sert ağaçtan yapılan levhalar yüksek mukavemete sahip malzemelerden yapılan tabakalara yapıştırılırlar. Ahşap malzemeler yapıya yüksek bir basma dayanımı sağlamaktadır. Balsa ağacı çekirdek malzemesi olarak havacılık endüstrisinde yaklaşık olarak 40 yıldan bu yana kullanılmaktadır [12,13].

2.2. Yüzey Malzemeleri ve Özellikleri

İnce levhalar halindeki hemen hemen tüm yapısal malzemeler sandviç panelin yüzeylerini oluşturmak için kullanılabilirler. Genel olarak yüzey malzemesi olarak kullanılan materyaller metalik ve non-metalik (metal olmayan) olarak ikiye ayrılırlar. Birinci grup çelik, paslanmaz çelik ve alüminyum alaşımlarını içerir. İkinci grupta da kontraplak, ahşap, takviyeli plastik ve fiber kompozit gibi materyaller bulunmaktadır. Yüzeyler için öncelikli özellikler şunlardır [8,9,12,13]:

- Yüksek eğilme mukavemeti veren yüksek sertlik.
- Yüksek çekme ve basma mukavemeti.
- Yüzey pürüzsüzlüğü.
- Korozyon direnci.
- Aşınma direncidir.

2.3. Yapıştırıcılar ve Özellikleri

Birleştirme işlemi için birçok çeşit yapıştırıcı bulunmaktadır. Yapıştırıcılar yapının yapısal gerekliliklerini karşılayacak malzemeler arasında iyi ve uygun birleştirici özelliğe sahip olmalıdırlar. Yorulma mukavemeti, ısıl mukavemet ve

sürünme mukavemeti yapıştırıcılar ile ilgili öncelikli özelliklerdir. Kullanılan bazı yapıştırıcılar şunlardır [8,9,12] :

1. Epoksi reçine

Genelde düşük sıcaklık kürleme reçineleri vardır (20 ile 90 °C arasında). Fakat bazı formüller yüksek sıcaklık kürlemesi (130 ile 220 °C arasında) için yapılmaktadır. Bunların çözücüsüz kullanılma ve buhar oluşturmada kürleme avantajları vardır. Bu da düşük bir hacim küçülmesi sağlar.

Çözücülerin bulunmayışı epoksileri neredeyse tüm çekirdek materyalleri ile kullanılır hale getirir. Epoksi; macun, zar, pudra veya katı yapıştırıcılar olarak kullanılır. Epoksinin tipik gerilme dayanımı yaklaşık olarak 20-25 MPa'dır [8,13].

2. Geliştirilmiş epoksi

Kuvvetlendirilmiş epoksiler, normal epoksilere benzerdir. Fakat büyük ölçüde direnç sağlayan polisülfat elastomer gibi sentetik kauçuk ile karıştırılmışlardır [13]. Ne kadar fazla elastomer kullanılırsa, o kadar fazla tel haline konulabilirlik artar. Fakat sürünme duyarlılığı paralel olarak artarken ısı direnci azalmaktadır. Diğer modifikasyonlar bağlanmayı ve akış kontrolünü geliştirmek için Naylon içermektedirler.

3. Fenolik

Fenolik yapıştırıcılar mükemmel bir dayanıma, yüksek sıcaklık mekanik özelliklerine ve sürekliliğe sahiptirler. Başlıca dezavantajları kürleme yaparken gerekli boşaltma sırasında bir miktar su ortaya çıkartmalarıdır. Viskozite oldukça yüksektir. Bu karakteristikler, boşaltımın engel olmadığı ve yüksek sıcaklık bağlantısı gerektiren petek yapımı prosesinde fenoliğin kullanımını kısıtlamaktadırlar. Dışarıya gaz-salımı (out-gassing) fenoliğin sandviç konstrüksiyonların birleştirilmesinde kullanımını uygunsuz hale getirmektedir [13].

4. Poliüretanlar (Polyurethanes)

Poliüretan yapıştırıcılar sandviç elemanları birleştirmede kullanılan en yaygın yapıştırıcılardır. Bunun sebebi çoğu materyale mükemmel yapıştırma özellikleri oldukları içindir. Değişik viskozite aralıklarında katı veya sıvı olarak kullanılabilirler. Kısa veya uzun kürleme zamanları olabilir. Yangın geciktirici ve su geçirmezlik özelliklerine sahiptirler. Poliüretan yapıştırıcılar çözücü içermezler. Bu yüzden de çevreye zararlı yanları yoktur ve diğer reçineler içinde zehir oranı en az olan yapıştırıcılardır.

5. Üretan arkilat (Acrylates)

Üretan Arkilat polyester ve vinylester için uygun bir reçinedir. Çünkü arkilatlar birleşmeye oldukça uygundur (örneğin bir ıslak polyester tabakasıyla). Üretan arkilatlar çok dayanıklıdır ve neredeyse hiç kürleme hacim küçülmesi ortaya çıkarmazlar. Sandviç yapılarıdaki köpük çekirdeğin yüzey-çekirdek arası bağlayıcılığını arttırmanın bir yolu da çekirdeğe en yakın ilk destekleyici tabakada üretan arkilat kullanmaktır.

Tabakanın geri kalan kısmı da ıslak olarak, örneğin arkilat tabakasının en üstünde polyester reçine kullanılarak tabakalandırılabilir ve böylece daha mükemmel bir içsel bağlantı elde edilmiş olunur [12,13].

6. Polyester ve vinylester reçineler

Polyester ve vinylesterler havacılık endüstrisinde güçlendirilmiş plastik kompozitlerde kullanılan en yaygın matris malzemeleridir. Prefabrike edilmiş tabakalar, örneğin köpük veya balsa çekirdekler tabakadaki aynı reçineyi kullanarak, bağlantı yapılabilirler. Genellikle tabaka doğrudan olarak çekirdek üzerine inşa edilir ve tabakanın ilk katı çekirdeğe ıslak olarak yayılır ve direkt olarak ona bağlanır. Bu prosedürde tüm yüzey hücrelerini doldurmak şarttır aksi takdirde bağlantı hattında kuru alanlar kalabilir [8,9,13]. Bu reçinelerin bir problemi, kürleme hacim küçülmelerinin çok yüksek kesme gerilmesi yaratmalarıdır. Küçülmenin azaltılmasının bir yolu yüzey hücrelerini dolduracak kadarlık reçinenin çekirdek yüzeyine sürülmesidir ve bu da tüm tabakalara uygulanmadan önce kürleme imkanı sağlar .

2.4. Sandviç Kompozitlerin Avantaj ve Dezavantajları

2.4.1. Sandviç Kompozitlerin Avantajları

Sandviç kompozitlerin diğer malzeme ve metallere karşı bu kadar ilgi çekmelerinin ve alternatif hale gelmelerinin en önemli nedenleri şunlardır: [7]

- Aynı ağırlıktaki metal ve diğer malzemelere oranla basma ve yorulma mukavemetlerinin çok daha fazla olması.
- Hafif olmaları (%25-45 daha hafif).
- Yeni tasarım esneklikleri sunmaları.
- Korozyona karşı dayanıklı olmaları.
- Düşük ısı geçirgenliği.
- Çekme dayanımlarının çelik ve alüminyumdan 4-6 kat fazla olması.
- Sertliklerinin yoğunluklarına oranının, çelik ve alüminyumdan 3,5-5 kat fazla olması.
- Yorulma mukavemetinin yüksek olması.
- Darbeleri soğurma enerjilerinin diğer malzemelerden önemli ölçüde fazla olması.
- Bağlantı elemanlarının diğer malzemelerdekine oranla daha az kullanılması sonucu, bu elemanlardan kaynaklanan yapısal zayıflıkların en az düzeyde olmasıdır.

2.4.2. Sandviç kompozitlerin dezavantajları

Sandviç kompozitlerin mantığı gereği, yapıyı oluşturan her tür bileşenin olumsuz özellikleri sandviç kompozit malzemeye de yansiyacaktır. Örneğin çekirdek malzemesi olarak kullanılan malzemenin düşük mukavemette oluşu yada yapıştırıcı olarak kullanılan reçinenin organik çözücülere karşı dayanıksızlığı sandviç yapının da istenmeyen özellikleri olacaktır.

Sandviç kompozitlerin en büyük dezavantajları şunlardır: [7]

- Katlar arasında kalan hava ve gazlar malzemenin ömrünü azaltır.
- Ara katlar arasında kalan gizli yapışmaları incelemek zordur.
- Test yapma yöntemleri pahalıdır.
- Sıcaklık farklılıklarında bozulurlar.

- Ham malzemeleri pahalıdır; ancak bağlantı elemanları sayısındaki azalış, ağırlıktaki düşüş dikkate alındığında toplam maliyette bir düşme görülecektir.
- Sandviç kompoziti oluşturan her bir bileşenin olumlu-olumsuz tüm özelliklerin ana yapıya yansımalarıdır.

Uçak yapılarında yaygın olarak kullanılan sandviç kompozitlerin düzenli olarak kontrol edilmeleri ve sandviç yapı içinde herhangi bir süreksizliğin bulunup, bulunmadığının bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle çalışmada özellikle sandviç malzemelere uygulanan tahribatsız muayene yöntemlerinden radyografi, termografi, akustik emisyon ve penetrant sıvı kontrol yöntemleri incelenmiştir.

3. RADYOGRAFİ TEKNİĞİ

Hava araçlarının çok pahalı araçlar olması, yenilenmelerinin ve değiştirilmelerinin yüksek maliyetler oluşturması ve bu oranda da yüksek emniyet gerektirmesi, bakımların optimum sürelerde ve doğru bir şekilde yapılmasını zorunlu hale getirmektedir; böylece istenen yapısal emniyette sağlanmaktadır. Radyografi yöntemi de kontrol süresinin kısa oluşu ve sonuçların net, doğru ve eksiksiz oluşundan dolayı havacılık uygulamalarında vazgeçilemez bir tahribatsız muayene yöntemidir. Bu teknikte yüzey altı ve yüzeye açık süreksizlikler kolayca tespit edilebilmektedir. Uçaklar üzerinde birçok uygulama alanı bulunmaktadır. Örneğin iniş takımları, kanat yapısı, gövde yapı ve bağlantıları, kumanda yüzeyleri, tüm kapak ve kapılar, motor bağlantı ve kaportaları gibi bölümlerin yapısal durumlarının kontrollerinde kullanılmaktadır [9]. Özellikle uçak yapısı içerisinde bulunan ve kontrolleri diğer malzemelere nazaran zor olan sandviç kompozitler için radyografi yöntemi uygun ve etkili bir tekniktir.

Bu bölümde öncelikli olarak radyografinin kullanımının dayandığı bazı fiziksel prensipler incelenmiş, daha sonra da uygulama örnekleri verilmiştir [14].

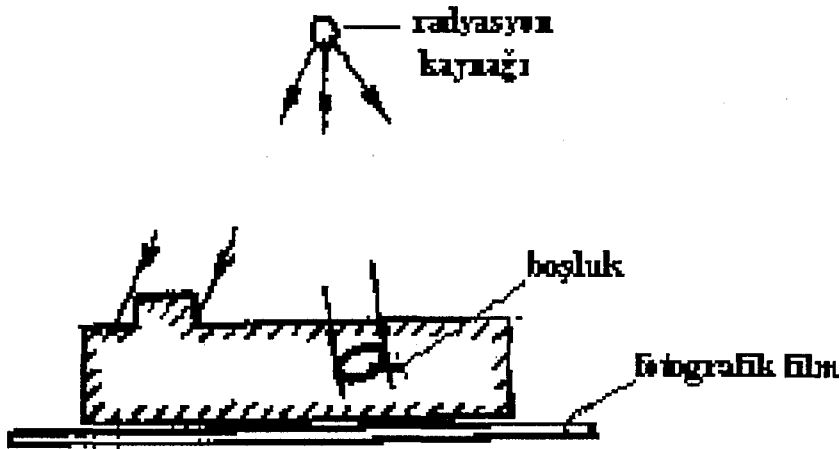
3.1. Radyografi Yönteminin Temel Prensibi

1895 yılında Wilhelm Conrat Röntgen, genleşmiş gazlar içinde elektrik akışı ile oluşmuş özel bir tip radyasyonun kağıt, tahta, insan vücudu ve ince metaller içinden geçebildiğini keşfetmiştir. Daha sonraki senede Becauerel bazı uranyum yatak cevherlerinin aynı nitelikte, fakat daha fazla radyasyon geçişi sağladıklarını ortaya çıkartmıştır ve bunlar gamma ışınlarıdır .

Birinci Dünya Savaşı esnasında Röntgen tarafından keşfedilen radyasyon onun tabiri ile x-ışınları uçakların pervanelerinde çatlak kontrolü için kullanılmıştır. O yıllardan bu yana x ve gamma ışınları genişleyen bir oranla değişik uygulama alanları bulmuştur [9,14,15].

X veya gamma ışını üretmek için incelenilecek parça üzerine bir ışın demeti gönderilir ve ışının parça içinden geçişi esnasındaki ışımadaki farklılıklar özel bir film üzerine kaydedilir. Şiddetteki değişiklikler parçanın kalınlık ve

yoğunluk değişimleri tarafından oluşur. Şekil 3.1’de radyografik işlemin prensibi gösterilmiştir



Şekil 3.1. Radyografik işlemin prensibinin gösterimi [14]

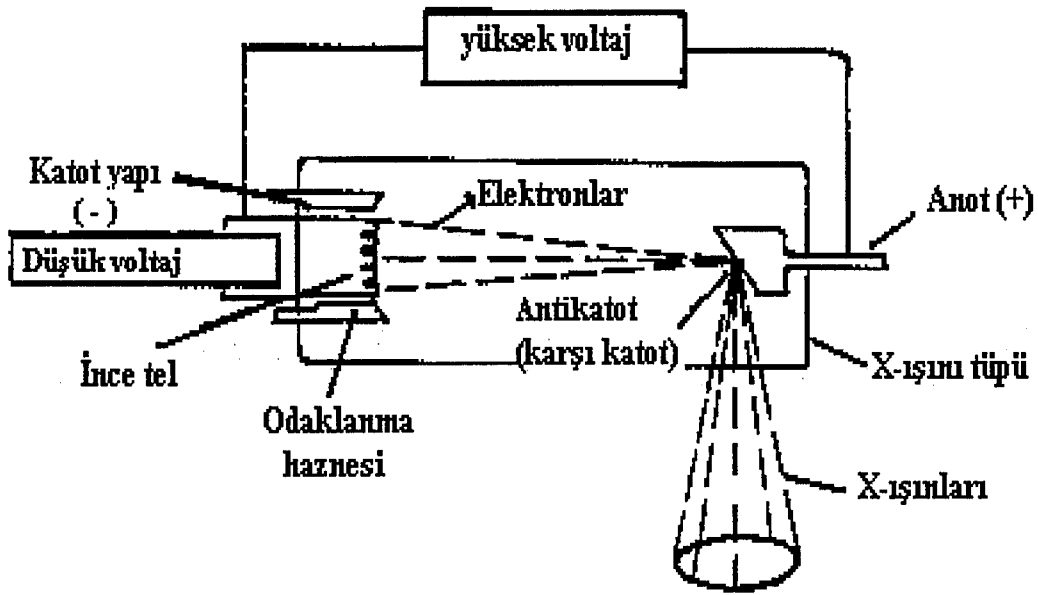
X veya gamma ışını kaynağı yerine nötron kaynağı kullanılır ise x veya gamma ışınlarına duyarlı fotoğrafik film direkt olarak kullanılmaz. Bu durumda yayılımı esnasında x-ray filmini etkileyen nötron yayılımı için uygun bir görüntü ekranı kullanılır. Bu görüntü sayesinde parçanın iç yapısı hakkında bilgi veren bir fotoğraf elde edilir ve bunun yorumlanması da tecrübe ve deneyim sayesinde yapılabilmektedir.

3.1.1. X- Işımları

X ışınları vakumdaki elektronların bir antikatoda yüksek hızla çarpabilmeleri için ivmelendirildiklerinde oluşurlar. Genelde bu karşı katot tungstenden yapılmıştır.

Elektronlar ince telin ısıtılmasıyla oluşturulurlar. Anot ve katot arasındaki yüksek voltaj (tüp voltajı) elektronların ivmelenmesini ve antikatoda vurmalarını sağlar. Böylece x-ışınlarının yayılımını sağlar. Odaklanma haznesinin (focusing cup) içinden geçen elektron akışı antikatotun “odak noktası” olarak adlandırılan küçük bir bölgesine yoğunlaşır ve bu odak noktasının büyüklüğü x-ışını radyografisinde önemli bir parametredir. Odak noktasının büyüklüğünü

belirleyecek değişik prosedürler bulunmaktadır. Şekil 3.2’de x-ışını tüpü konik ışınım sağlar. Fakat tüpü 360° saracak şekilde radyasyon alanı oluşturan x-ışını tüpleri de bulunmaktadır. 400 kV’a kadar olan tüp voltajları için, ince telde üretilen elektronların antikatota doğru doğrusal bir hat izleyebilmeleri için tüpler yerleştirilmiştir. 1-30 mV voltaj aralığında bazı x-ışını tüpleri öyle yerleştirilmiştirler ki, elektronlar spiral bir hatta ivmelendirilirler. Bu normal elektron hattına nazaran daha güçlü bir manyetik alan oluşturularak sağlanır [14].



Şekil 3.2. X-ışını tüpünün şematik gösterimi [14]

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan x-ışını tüpleri ürettikleri tüp voltajlarının büyüklükleri ile orantılı olarak sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırma şöyledir : [14]

5 kV – 50 kV	düşük voltaj
50 kV – 300 kV	orta voltaj
300 kV – 1 MV	yüksek voltaj
1 MV – 30 MV	süper voltaj

Sandviç kompozitler test edilirken genelde düşük voltajlı ve orta voltajlı tüpler kullanılmaktadır.

Öncelikli olarak elektromanyetik ışınımın enerji miktarının belirlenebileceği bir denklem verilmiştir :

$$E=h.f = h.c/\lambda \quad (3.1)$$

Burada E enerjiyi, f frekansı, h Planck sabitini, c ışık hızını ve λ 'da ışınımın dalga boyunu göstermektedir. Denklem 3.1'de h ve c sabit oldukları için kısa dalga boylu radyasyonun, yüksek enerjiye sahip olacağı dolayısıyla da uzun dalga boylu radyasyona nazaran daha yüksek geçirgenlik gücüne sahip olacağı açıktır [14,16,17].

Elektronların antikatoda çarptıkları andaki hızları tüp voltajıyla belirlenir. Böylece tüp voltajı artırılınca elektronların enerjileri de artacaktır.

Daha büyük enerjili elektronlar çarptığında antikatottan salınan radyasyon daha enerjik olacağından, tüp voltajını arttırarak x-ışını demetinin dalga boyu azalacaktır. Buna rağmen antikatottan salınan radyasyon tek bir dalga boyundan oluşmadığı ve hatta geniş sayıda dalga boyundan oluştuğu için devamlı bir spektrum olarak kabul edilir. Bu spektrumdaki en uzun dalga boyları tüp duvarları ve tüp yolları tarafından absorbe edilir. Bu tüp kafasının doğal filtrelemesi olarak bilinir.

Radyasyon şiddetini arttırmak için, bir kişi antikatota ulaşan elektronların enerjisini arttırabilir (örneğin tüp voltajı arttırılabilir) veya birim zamanda antikatota ulaşan elektronların sayısını arttırabilir. Buna rağmen tüp voltajının arttırılmasının ana amacı geçirgenlik gücünün arttırılmasıdır ve bu da şiddet değiştirildiğinde değişen elektronların akışıdır.

3.1.2. Gamma ışınları

Önceden de belirtildiği gibi, farklı kaynaklar olmalarına rağmen x ve gamma ışınlarının doğaları benzerdir. Gamma ışınlarının kaynakları belirli radyoaktif izotoplardır ve bu tip bir ışınımı kullanmanın açık olarak

avantajlarından biri elektrik gücünden bağımsız olmasıdır. Diğer avantajları düzeneğin basitliği, kullanılışlılığı, taşınabilirlik ve ışınım kaynağının yoğunluğudur. Gamma ışını kaynakları x-ışını tüpleri gibi sürekli bir spektrum üretmezler; fakat az sayıda kesikli dalga boyu yayarlar. Bu dalga boyları (enerjiyi belirlerler ve bu nedenle de denklem 3.1'deki geçme gücünü belirlerler) ayarlanamazlar. Fakat radyoaktif kaynağı tarafından belirlenirler.

Gamma radyasyon enerjisini tanımlayan bir birim (hatta yüksek ve süper voltaj x-ışınları içinde geçerli) elektron voltur (eV). 1eV, 1 voltluk potansiyel farktan dolayı hareket eden bir elektronun kinetik enerjisidir. Genelde eV'un katları olarak keV (bin elektron volt) ve MeV (milyon elektron volt) şeklinde ifade edilir. 500 keV'luk bir gamma ışını kaynağının geçirgenlik gücünün, 500 kV'lık x-ışınıninkine eşit olduğunu söylemek yanlış olur. X-ışını spektrumundaki en kısa dalga boyu, gamma ışınındaki geçirgenlik gücüne eşittir. Fakat geri kalan dalga boyları daha az geçirgenliktedirler. Örnek olarak, cobalt 60'dan 1,17 ve 1,33 MeV'luk enerjili dalga boyu olan iki gamma ışınımı 2 MV'luk x-ışını tüpünün ışınımına eşittir. Radyoaktif kaynak için şiddet direkt olarak birim zamandaki atomların bölünmesi ile ilişkilidir. 1 saniyedeki $3,7 \times 10^{10}$ atom bölünmesine eşit olan aktivite 1 curidir (radyoaktivite ölçüm birimi) [14,15].

Eğer tüm atom bölünmeleri ile oluşan enerji kaynaktan ısınırsa (yansıtılırsa) ışınımın şiddeti, aktivite (atom bölünmelerinin sayısı) ile doğru orantılı olacaktır. Buda özellikle bu geniş ışınım kaynakları için geçerlidir. Enerjinin bir kısmı kaynağın kendi tarafından emilecektir. Bu da self-emilim olarak adlandırılır.

Kaynak faaliyeti, gamma ışını dozajı faktörü (kaynağın cinsine bağlı olan bir faktör) ile çarpılırsa röntgendeki şiddet (self-emilimi ihmal ederek) elde edilir. Gamma ışını kaynağı kullanmanın bir dezavantajı aktivite veya şiddetin ayarlanmamasıdır. Fakat bunlar kullanılan kaynağa ve geçen zamana bağlıdır. Aktivite, yarı-ömür (yarılanma ömrü) adı verilen zaman geçtikten sonra yarıya iner. Örneğin iridyum 192 için bu süre 70 gün ve kobalt 60 için 5.3 yıldır.

3.1.3. Nötron radyografisi

Adından da anlaşılacağı üzere nötron radyografisi nötronların (atom çekirdeği içindeki elektrik yükü taşımayan atomik parçacıklar) akışını kullanırlar. X ve gamma ışınlarının emilimi inceleme altındaki malzemenin atom numarasının artırılmasıyla, çoğaltılmış olur. Bu durum hidrojen içeren malzemeler tarafından kolayca emilen nötronlar için geçerli değildir ve yüksek atom numaralı malzemeler daha az miktarda emilim yaparlar [14].

Önceden de belirtildiği gibi, nötronlar x-ışını filmini etkilemezler. Bu yüzden böyle bir film kullanılacağında, filmle direkt teması olan bir görüntü ekranı kullanılmaktadır. Bu ekran nötronlar tarafından uyarıldığında, filmin duyarlı olduğu radyasyonu yayar. Böyle bir otomatik radyografi tekniğinde görüntü ekranı nötronlara maruz kalır ve daha sonra hemen arkaya yerleştirilmiş olan filmde radyografik görüntü sağlar.

Değişik tipte nötron kaynakları bulunmaktadır. Bunlardan birisi belki de en yaygını, reaktörün içine doğru uzanan bir bölmede nötron elde edilen nükleer reaktörlerdir. Kullanılmadan önce yavaşlatılması gereken, yüksek hızlı nötronlar üreten elektronik kaynaklar da bulunmaktadır. Son olarak radyografide kullanılmadan önce yavaşlatılması gereken hızlı nötronlar üreten izotop kaynakları bulunmaktadır (örneğin kaliforniyum 252) [14].

3.2. Görüntü Ekranlarının Kullanımı

Görüntü ekranları radyografi görüntüsü alınacak parça üzerine gönderilen radyasyon artırılması için kullanılır. Görüntü ekranları iki tiptir: Floresanlı şiddetlendirilmiş görüntü ekranları ve kurşun ekranlarıdır.

1. Floresan ekranlar

Baryum kurşun sülfat ve kalsiyum tungsten gibi bazı kimyasallar x veya gamma ışınına maruz bırakıldığında görünür ışığı geçirme özellikleri vardır. Bu radyografik uygulamalarda şu şekilde kullanılmaktadır: Film iki ekran arasına ve onlarla temas olacak şekilde yerleştirilir. Böylece film hem görünür ışıktan hem de x-ışınından etkilenecektir. Dolayısıyla toplam etki bu iki etkinin bileşkesi

olacaktır. Burada 10 ila 60 kat arasında bir şiddetlendirici faktör elde etmek mümkündür.

Fakat floresan ekran kullanmanın bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlardan biri ekranın ışığı ayırması ve bulanık dış hatlı radyografi filmi üretmesidir. Bunun sebebi x-ışınları ekranı geçerken çok iyi belirlenmelerine rağmen, ekrandan çıkan ışığın her yönde yansımaya uğramasıdır. Diğer dezavantajları, öncelikli olarak olmasa da dağınık ışınımının şiddetlendirilmesidir. Dahası floresan ekranlar kurşun ekranların yaptığı gibi dağınık ışınımı emmemektedirler.

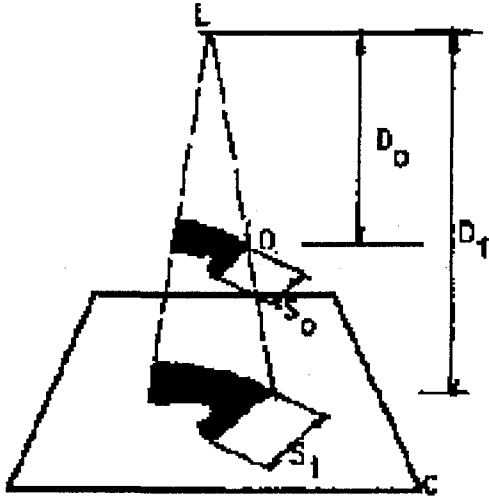
2. Kurşun ekranlar

Bunlar öncelikli olarak x-ışını filminin her iki yanına ve yakın temas halinde yerleştirilmiş olan ince kurşun plakalardır. Radyasyon kaynağına yakın olan plaka 0.02 – 0.15 mm kalınlığa sahip iken, ekranın arka tarafındaki plaka genelde iki kat kalınlıktadır. Arka ekranın görevi dağınık radyasyonu toplamak iken, ön ekranda radyografi uygulanacak nesnenin üzerine uygulanan duyarlılığı artırmak, dolayısıyla da poz süresini kısaltmak için elektronları ve ikincil radyasyonu üretir [14,15].

3.3. Röntgen Filminin Kalitesi

Bu bölümde radyografinin kalitesini etkileyen bazı faktörler üzerinde durulmuştur. Radyografiyi etkileyen bazı geometrik faktörler görünür ışığa nazaran açıklanmıştır. Bir ışık "L", bir saydam olmayan bir objenin "O" üzerine yansıyor ve beyaz bir kart "C" üzerine bir gölge oluştursun (şekil 3.3). Eğer nesne beyaz kart üzerine tam yerleştirilmez, orada belirli bir mesafe olursa, gölge objenin genişletilmiş bir görüntüsü olarak yansiyacaktır. Burada genişlemenin oranı şöyle verilebilir : [14]

$$\frac{S_i}{S_0} = \frac{D_i}{D_0} \quad (3.2)$$

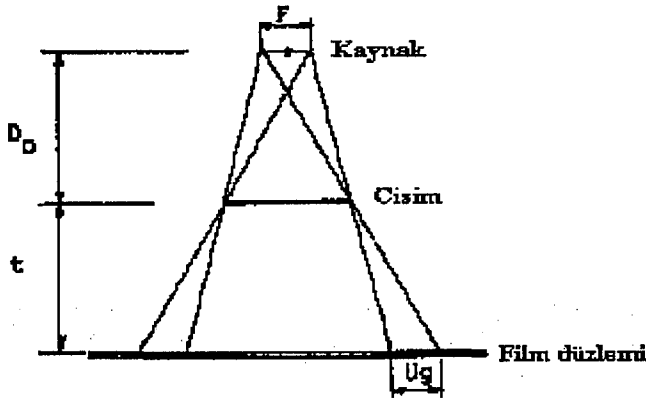


Şekil 3.3. Genişletme (büyütme) derecesi [14]

Şekil 3.3'de L bir nokta kaynağı olarak kabul edilir. Bu bir x-ışını kaynağı için doğru değildir. Öyle ki odak nokta geometrik bulanıklığı arttıran sonsuz doğrultuya sahiptir. Bu da şekil 3.4'te gösterilmiştir. Geometrik bulanıklık U_g şekil 3.4'ten kolaylıkla elde edilebilir.

$$U_g = F.t/D_0 \quad (3.3)$$

Burada F, t ve D_0 şekil 3.4'te belirtilmiştir.



Şekil 3.4. Geometrik bulanıklığın gösterimi [14]

Görüntüyü etkileyebilecek diğer bir faktör de merkez ışın ile film düzlemi arasındaki açıdır. Eğer bu açı 90° olmazsa görüntü değişime uğrayacaktır; örneğin dairesel bir cisim eğer açı 90° olmazsa eliptik bir görüntüye sahip olacaktır.

Radyografik uygulamalarda göz önünde bulundurulması gereken bazı genel kurallar aşağıda verilmiştir:

- (1) Küçük bir odak noktası istenir (denklem 3.3). Eğer bu sağlanamazsa D_0 mutlaka büyütülmeli ve/veya t küçültülmelidir.
- (2) Odak noktasından film düzlemine kadar olan mesafe mümkün olduğunca geniş olmalıdır.
- (3) Önceden de belirtildiği gibi merkez ışınıyla film düzlemi arasındaki açı 90° 'ye mümkün olduğunca yakın olmalıdır.

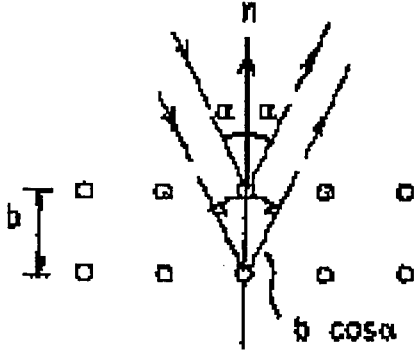
Radyografideki önemli bir parametrede pozdur. Bir x-ışını tüpünde, “ t ” süresinde etkileyen tüp akımı “ m ” ise, poz şöyle tanımlanır :

$$D = m.t \quad (3.4)$$

Burada örneğin D için birim mA s 'dir (miliamper-saniye). Gamma ışını kaynağı içinde olan poz denklem 3.4'ten çıkartılabilir; fakat burada “ m ” curi cinsinden kaynak aktivitesi, dolayısıyla da D için uygun birim curi-dakika olacaktır. Radyografi (filminin) kalitesini belirlemek için “görüntü kalite göstergesi” olarak adlandırılan bir gösterge kullanılır. Görüntü kalite göstergeleri bir çok değişik standartlarda belirtilmiştirler. Genelde yaygın olarak bir GKG değişik çaplarda ve radyografi uygulanacak nesneyle aynı malzemedeki tellerden oluşur. Radyografik görüntünün kalitesi radyografi filmi üzerinde görülen en küçük telin çapının nesnenin kalınlığına oranıdır.

3.4. X-ışını Kırılması

X-ışınları, her zaman, ışınların geçirgenlik özelliğinden yararlanılan uygulamalarda kullanılmazlar. Bazı uygulamalarda x-ışını kırılması olarak adlandırılan bir olay kullanılabilir. Örneğin gerilme değerlerinin ölçülmesi için. Şekil 3.5 bu olayı basit bir şekilde açıklamaktadır.



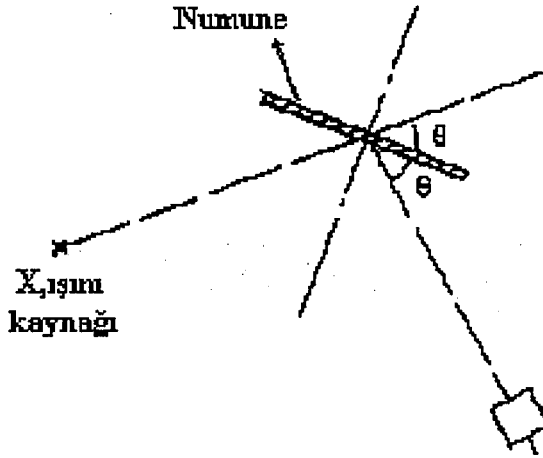
Şekil 3.5. İki atomsal düzlemden yansımış iki paralel x-ışını demeti [14]

Şekil 3.5’de, b atomlar arası boşluktur ve $\pi/2 - \alpha$ Bragg’ın kırılma açısıdır. α , b ve dalga λ arasındaki bağıntı şöyledir :

$$\lambda = 2 \cdot b \cdot \cos \alpha \quad (3.5)$$

α ’yı doğru olarak ölçmek mümkündür (şekil 3.6). Burada σ değiştiğinde, kırılmış x-ışınlarının şiddeti θ ’nın belirli bir maksimum değeri olan θ_0 ’ı gösterecektir. θ_0 ve α arasındaki bağıntı şöyledir :

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad (3.6)$$



Şekil 3.6 X-ışını yansımalarının ölçülmesinin şematik gösterimi [14]

Eşitlik 3.5 şekil değişimi ölçümlerinde şu şekilde kullanılabilir. Farz edelim ki yapı yük altında değil iken atomlar arası boşluk b olsun. Denklem 3.5'den şu elde edilir :

$$b = \lambda / (2 \cos \alpha) \quad (3.7)$$

Yüklemeye birlikte b , Δb kadarlık bir değişime uğrayacaktır. Denklem 3.7'den şu ifade yazılabilir:

$$\Delta b = \lambda \cdot \sin \alpha \Delta \alpha / (2 \cos^2 \alpha) \quad (3.8)$$

Böylece n -doğrultusundaki şekil değişimi ϵ_n elde edilebilir (şekil 3.5) :

$$\epsilon_n = \Delta b / b = \tan \alpha \cdot \Delta \alpha \quad (3.9)$$

Burada $\Delta \alpha$, yüklemeye oluşan α 'daki değişimdir.

3.5. Filmsiz Teknikler (Oskopiler)

X-ışını radyografisinden bir test cihazı olarak yararlanırken, X-ışını filmini kullanmaktan kaçınmanın bir yolu floresan ekran kullanmaktır. Floresan ekran kullanmanın avantajlarından biri elde edilen görüntünün eş-anlamli (aynı anda) olmasıdır. Bu da hareketli nesnelere incelenebilme imkanı sağlamaktadır. Dezavantajları ise ekipman ve özellikle de ekranın, uygulayıcı personelin fazla radyasyondan etkilenmemesi için bir koruyucu gerektirmesidir. Dahası göz yorulması nedeniyle ekran karşısında 30 dakikadan daha uzun çalışmak ortaya çıkan radyasyonun doğal periyodundan dolayı oldukça zordur.

Diğer bir filmsiz teknik ise xeroradyografidir. Bu teknikte statik elektrikle yüklendiği zaman yüzeyi radyasyona duyarlı hale gelen bir tabaka kullanılmaktadır. Bu durumda tabaka mutlaka ışıktan korunmalıdır. X-ışını radyasyonunun iyonlaşma doğasına rağmen, tabakanın yüzeyi, tabaka üzerine düşen radyasyon miktarına göre deşarj olacaktır. Görüntüyü geliştirmek için tabakayla zıt yüklenmiş, plastik partiküller içeren bir toz kullanılmaktadır. Tabaka üzerindeki parçaların yoğunluğu elektrik şarjına ve alınan radyasyon miktarına bağlıdır ve böylece bir görüntü elde edilmektedir. Görüntüyü sürekli hale

getirebilmek için plastik parçacıkları, tabaka üzerine preslenmiş olan özel bir kağıt üzerine gönderilir ve kağıt ısıtılarak sabitlenirler. Pozitif görüntü elde edebilmek için koyu renkli parçacıklarla birlikte bir açık renkli kağıt kullanılır. Eğer negatif görüntü istenirse bunun tersi yapılır.

3.6. Bilgisayar Destekli Radyografi

Radyografi ile bağlantılı bir bilgisayar kullanarak görüntü oluşturmamanın farklı bir çok yolu bulunmaktadır. Bilgisayar bazlı bir radyografi düzeneği genel olarak üç bölüm veya alt sistemden oluşur: Bir görüntü elde eden sistem, bir görüntü oluşturan (conditioning) ve son olarak da görüntü üreten bir sistemdir. Test nesnesinden gelen sinyal bir şekilde alınır ve sonuç görüntüsü dijitalleştirilir ve hafızaya kaydedilir. Böylece bununla ilgili veriler daha sonra bilgisayardan elde edilebilecektir ve görüntü üzerinde oynamalar yapılabilecektir. Örneğin incelenilen parçanın belirli bir bölgesinin netliği artırılabilir.

3.7. Radyografi Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Her bir hasarsız kontrol yönteminin kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır. Radyografi yönteminin başlıca avantajları şunlardır: [14,15,17]

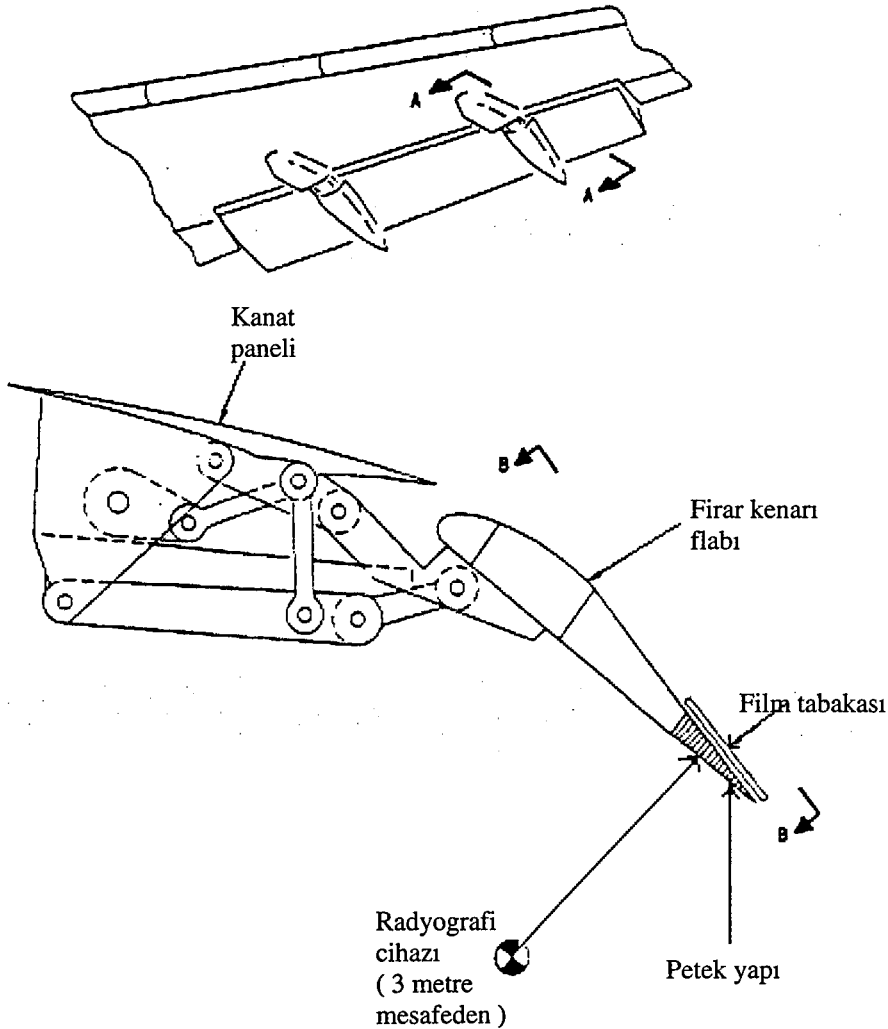
1. Yüzey ve yüzey altı süreksizliklerin tespiti.
2. Sonuçların kalıcı olarak kaydedilebilmeleri.
3. Uygulama yöntemlerinin basit olması.
4. Küçük hata ve süreksizliklerin tespit edilebilmesi.
5. Geniş uygulama alanı.

Bu avantajlarının yanında radyografi yönteminin birtakım dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir: [14,15,17]

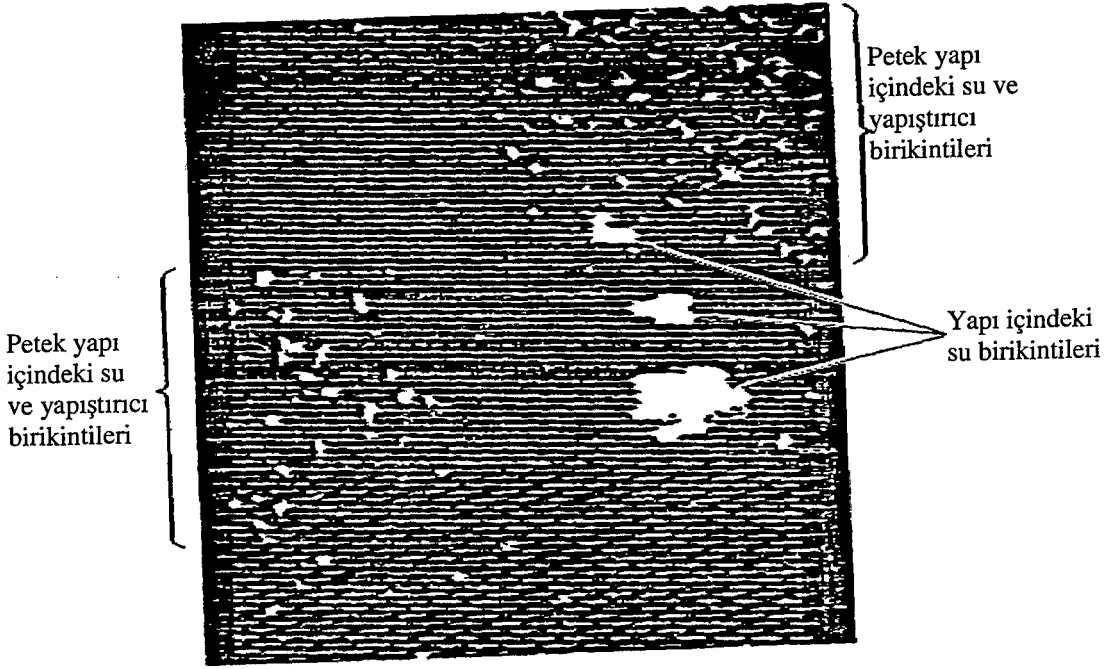
1. Test cihazlarının pahalı olması.
2. Uygulamaların maliyetli olması.
3. Test yüzeyi ve karşı yüzeyin açık olması gerekliliği.
4. Emniyet açısından risklerin ve tehlikelerin bulunması.

3.8. Uçaklarda Radyografi Tekniğinin Sandviç Kompozitlere Uygulanması

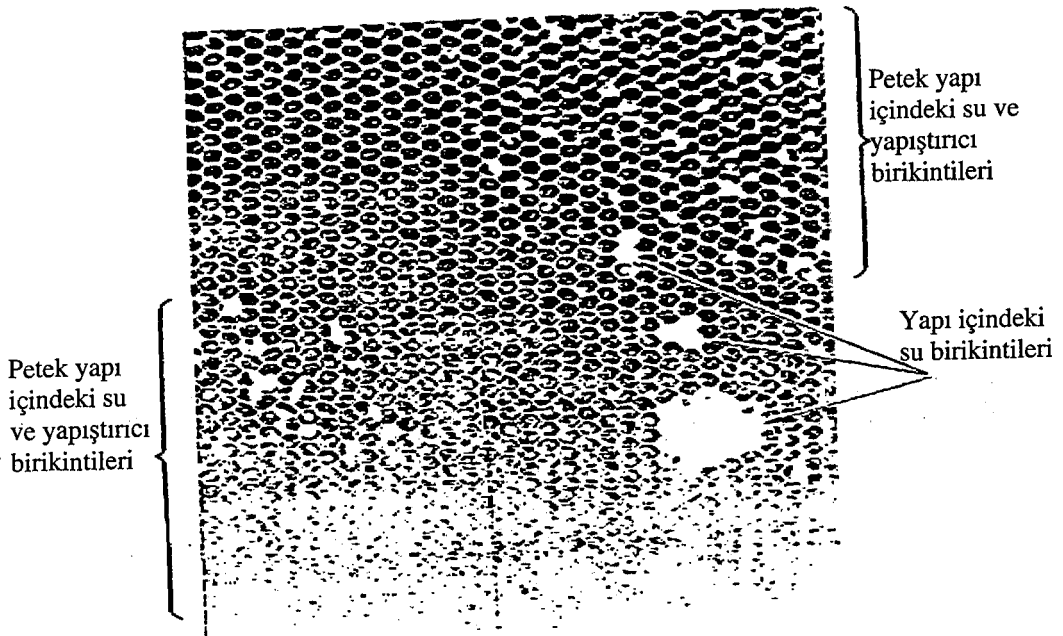
Radyografi tekniği uçaklarda genel olarak tüm malzeme ve ekipmana uygulanabilmektedir. İşlem süresinin kısa oluşu, aynı anda oldukça geniş aralıkların kontrol edilebilmesi, test sonuçlarının kalıcı olması ve kesin-doğru sonuçlar elde edilebilmesi açısından oldukça tercih edilen bir tekniktir. Bu yöntemle sandviç kompozit yapılarıdaki su, nem, yapıştırıcı bozulmaları, yorulma çatlakları, ezilmeler, petekdeki ayrılmalar ve yüzey malzelerinde oluşan süreksizlikler kolayca bulunabilmektedir. Şekil 3.7-3.14'de değişik uygulama örnekleri verilmiştir.



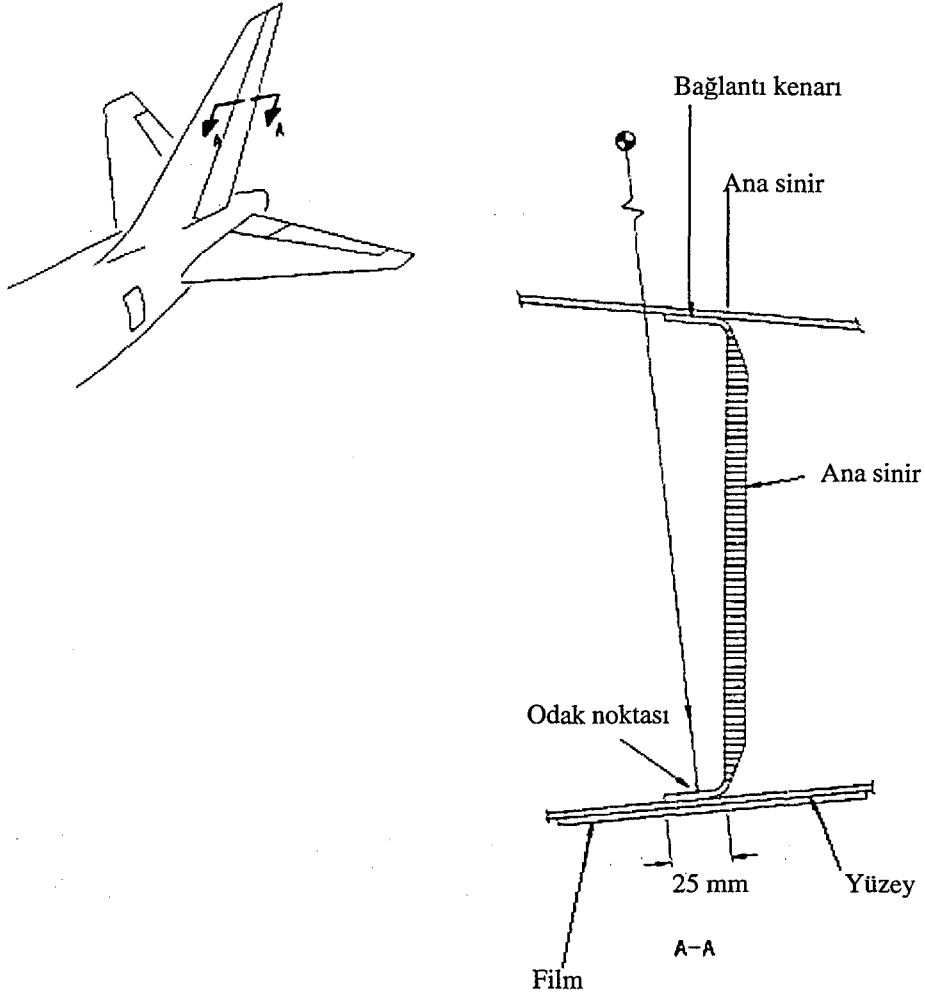
Şekil 3.7. Boeing 737-800 tipi uçağının flap ucunda bulunan petek yapıya radyografi yönteminin uygulanması [17]



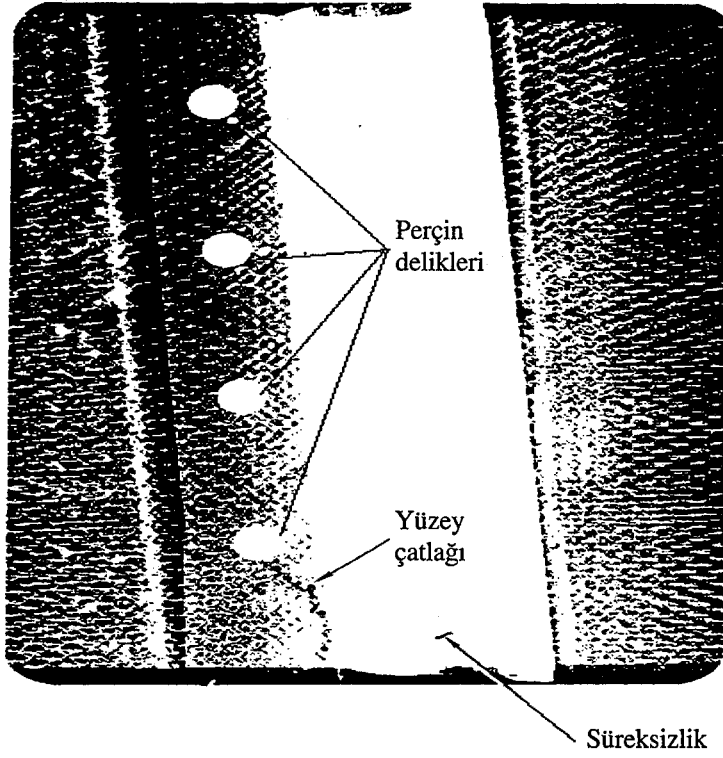
Şekil 3.8. Boeing 737-800 tipi uçağının flap ucunda bulunan petek yapıya radyasyon demetinin açılı gelmesi ile oluşan radyografi görüntüsü [17]



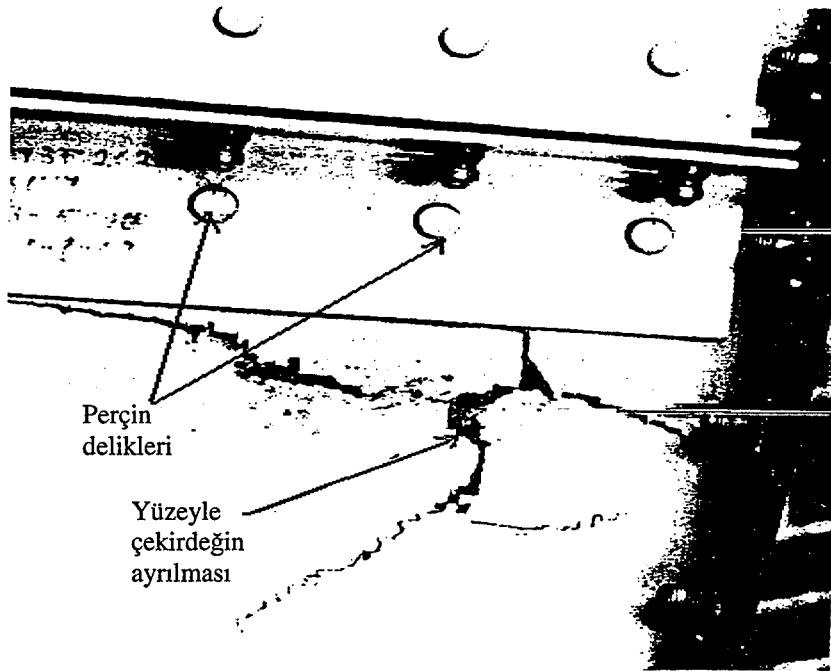
Şekil 3.9. Boeing 737-800 tipi uçağının flap ucunda bulunan petek yapıya radyasyon demetinin paralel gelmesi ile oluşan radyografi görüntüsü [17]



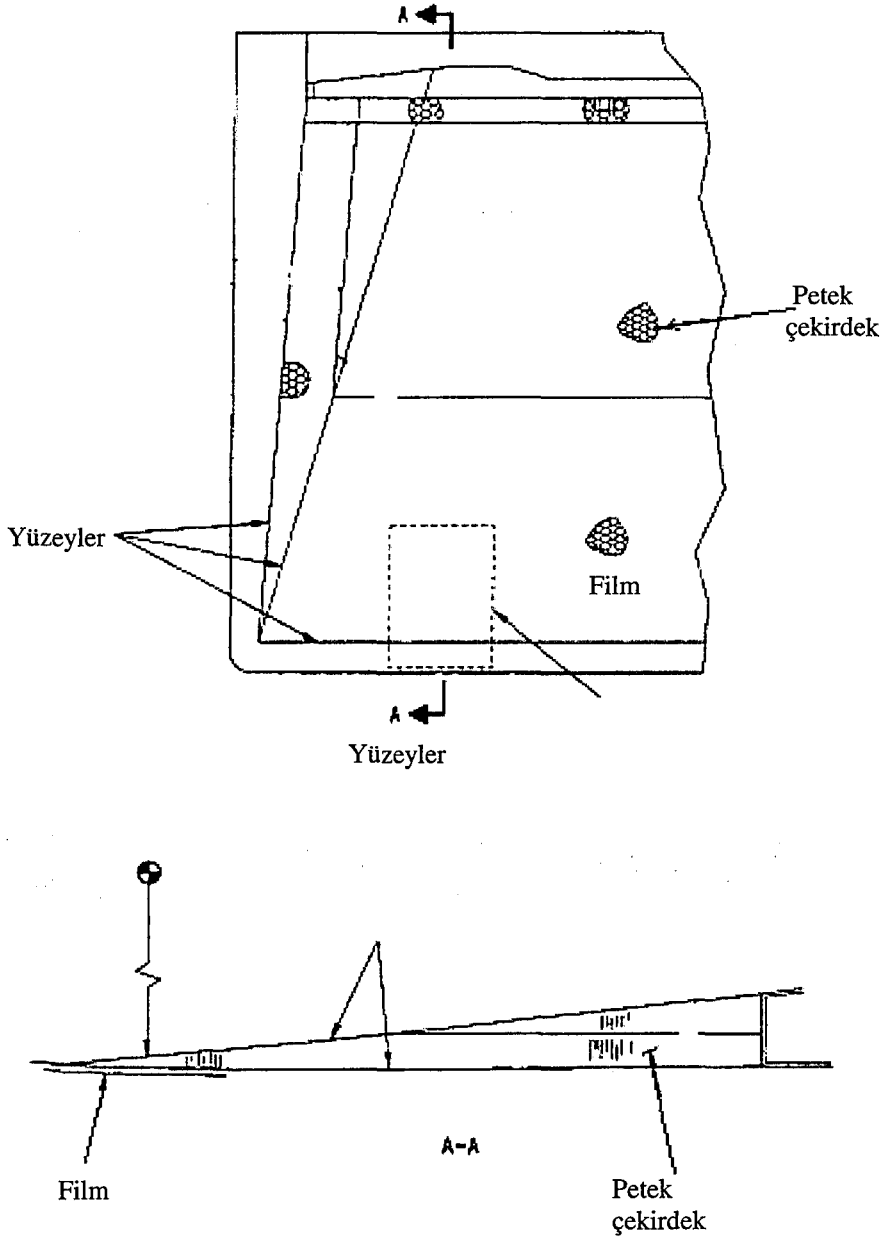
Şekil 3.10. Boeing 737-800 tipi uçağının istikamet dümeninde petek yapıya radyografi yönteminin uygulanması [17]



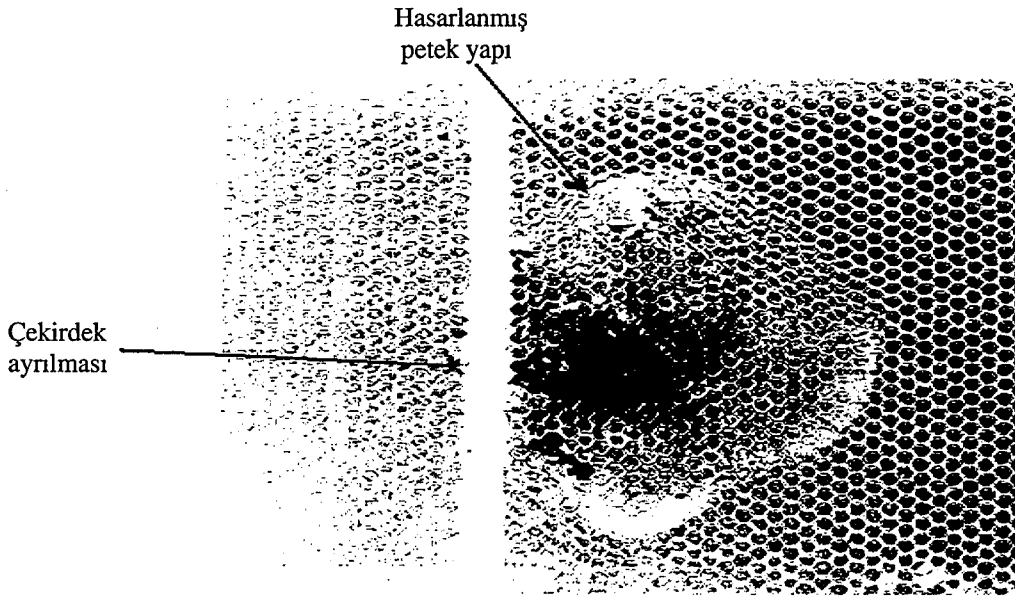
Şekil 3.11. Boeing 737-800 tipi uçağının istikamet dümeninde petek yapıya radyografi yönteminin uygulanması ile ortaya çıkan yüzey çatlağı [17]



Şekil 3.12. Boeing 737-800 tipi uçağının istikamet dümeninde petek yapıya radyografi yönteminin uygulanması ile ortaya çıkan yüzey çekirdek ayrılması [17]



Şekil 3.13. Boeing 737-800 tipi uçağının kanatçığı üzerinde bulunan petek yapıya radyografi yönteminin uygulanması [17]



Şekil 3.14. Boeing 737-800 tipi uçağın kanatçığı üzerinde bulunan petek yapıya yıldırım düşmesi sonucu oluşan hasarın radyografi yöntemiyle tespiti [17]

4. AKUSTİK EMİSYON TEKNİĞİ

Akustik emisyon tekniğiyle yüzey altındaki süreksizliklerin tespiti, yüzey değerlendirmeleri ve kaplama bağlantılarının yapışıklık kontrolleri yapılabilmektedir. Genel olarak akustik emisyon tekniği uçaklarda uçuş kumandaları, yakıt tankları, iniş takımı, yapısal bağlayıcılar, kabin ve kargo kapakları, gövde yapısal elemanları gibi bölümlerin yapısal kontrolünde kullanılmaktadır. Sandviç kompozitleri incelemeye yönelik yapılan akustik emisyon tekniğini içeren çalışmalarının çoğu sandviç yapılarda bulunan bozulmaların, çözümlerin ve hasarlanmaların yorumlanmalarını, ayırt edilmelerini ve takip edilmelerini hedeflemektedirler. Ayrıca korozyon ve korozyon gerilme etkileri de bu teknikle ele alınıp incelenmektedir [17,18].

4.1. Akustik Emisyonun Temel Prensibi

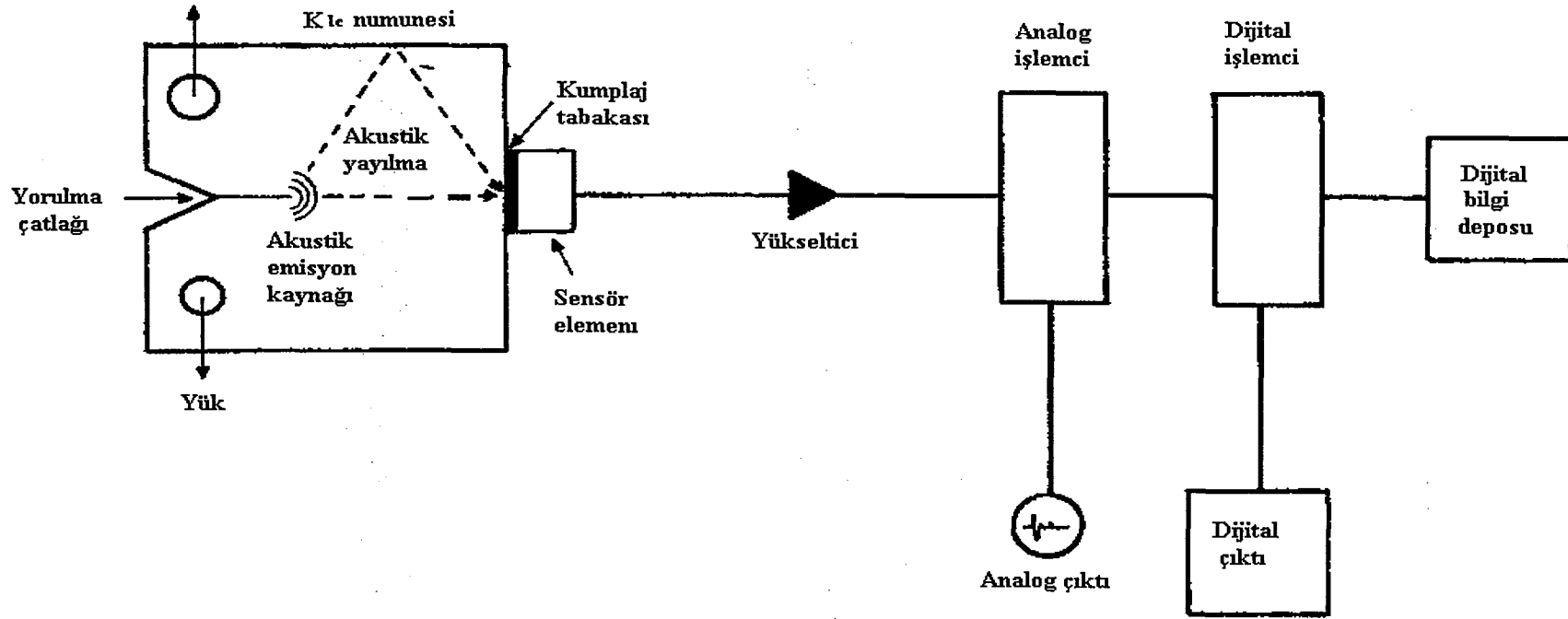
Akustik emisyon cihazı, malzeme bilimcilerin, malzemelerin bozulmalarından, çözümlerinden ve hasarlanmalarından kaynaklanan düşük seviyedeki sonik veya ultrasonik sinyalleri dinlemeyi sağlayan stetoskoplarına benzetilebilir. Metot; bir inceleme tekniği olarak, malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesine yardımcı olmak için, yapıların ve komponentlerin yapısal dayanımını değerlendiren bir tahribatsız muayene tekniği olarak veya bir kalite kontrol metodu olarak birçok alanda kullanılabilir [14].

Tarihte çok az sayıda yüksek enerjili akustik emisyon yöntemleri doğrudan kaynak kanamasını (kaynak dikişi üzerinde oluşan çatlak), döküm içindeki döküm çatlağını, seramik içindeki bozulmaları ve gıcırdayan propları tespit edebiliyordu. Bu olayların tespiti ve değerlendirilebilmeleri için yüksek kazançlı analog elektronik cihazlarla ilişkili olan duyarlı algılayıcılar kullanılması gerekiyordu. Bunun üzerine malzemelerin sistematik olarak incelenmelerini sağlamak için akustik emisyon faaliyetlerinin inceleme, değerlendirme ve analiz etme niteliklerini içeren tam anlamdaki bir teknolojik gelişme 1950'li yıllarda başlamıştır. Aslında bu yıllarda akustik emisyonun babası olarak kabul edilen, Münih Teknik Yüksekokulunda çalışan Josef Kaiser'in bazı laboratuvar çalışmaları bulunmaktadır. Bundan sonraki 30 yıl için akustik emisyon, bir laboratuvar

çalışması olmaktan çıkıp, endüstriyel bir tahribatsız muayene tekniğine hızla dönüşmüştür. Önceleri metot metallere üzerine yoğunlaşmıştır; fakat sonradan teknik daha geniş uygulamalara yönelmiş ve kompozitleri, seramikleri, plastikleri inceleme ve değerlendirme alanlarında da gelişmiştir [14].

Akustik emisyon tekniğindeki birçok değişik faktörün daha iyi anlaşılabilmesi için öncelikli olarak tekniğin ana özelliklerine değinilmiştir.

Eğer basit bir test olan K_{IC} (kırılma sertliği) testi incelenirse, akustik emisyonun içerdiği prensipler daha iyi anlaşılacaktır. Bir numuneye yük uygulandığında, numune elastik şekil değiştirmeye başlar; bu deformasyonla ilişkili olarak elastik şekil değişimi enerjisi depolanır. Çatlak yayıldıkça depolanan enerjinin bir kısmı serbest bırakılır. Bu salıverilen enerjinin bir kısmı yeni çatlak yüzeyi oluşturmak için gerekli yüzey enerjisi tarafından emilir. Bir kısmı plastik bölge büyümesi tarafından emilir ve bir kısmı da akustik emisyon faaliyeti üretir. Bu gerilme dalgaları kaynaktan, sadece direkt dalgaları almayı hatta yansıyan ve mod dönüştürücü komponentleri (mode-converted components) olan sensöre doğru hareket ederler. Elde edildiği anda bu sinyaller analog elektronik cihazlar tarafından daha iyi bir konuma getirilmeli ve dijital olarak analiz edilmelidir. Bu şematik olarak şekil 4.1'de gösterilmiştir [14].



Şekil 4.1. Akustik emisyonun tarama ve analizinin genel gösterimi [14]

Böylece son akustik emisyon sonuçları aşağıdaki tüm bu faktörlerin yardımına bağlı olacaktır [14]:

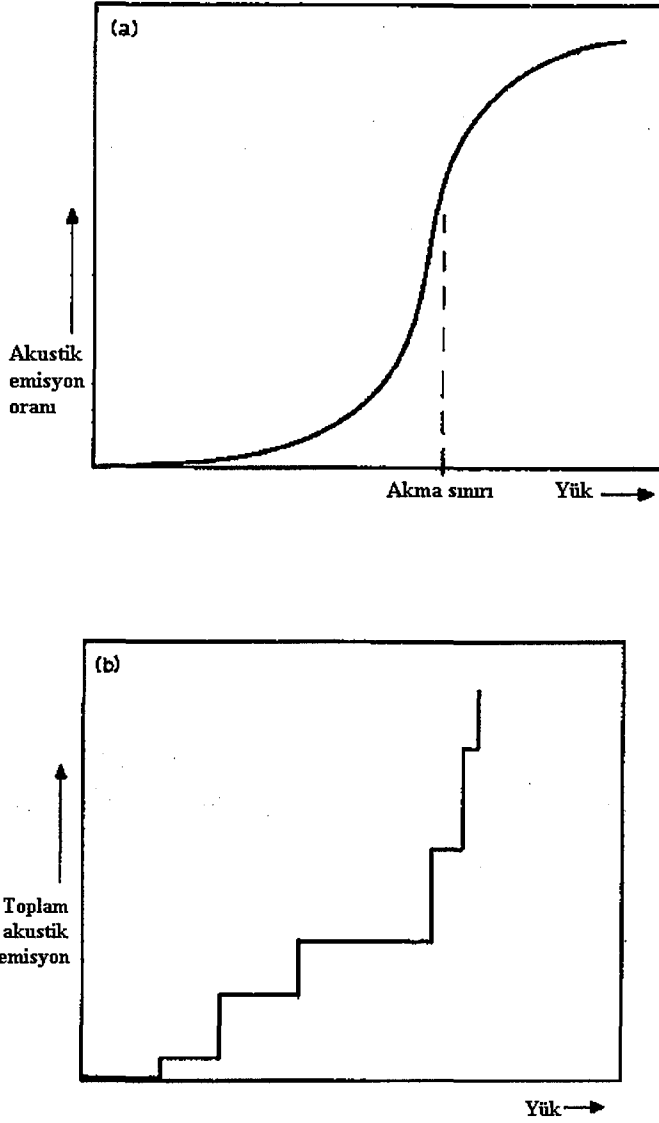
- (1) Malzeme bilimi: Test parçalarının mekanik davranışlarını belirtmektedir.
- (2) Kırılma mekaniği: Açığa çıkan enerji oranlarını ve bölünme işlevlerini belirtmektedir.
- (3) Akustik: Gerilme dalgalarının numuneden sensörün içine doğru olan yayılmaları belirtmektedir.
- (4) Dönüştürücü (Transducer) teknolojisi: Gerilme dalgasının elektrik sinyaline çevrilme verimini belirtir.
- (5) Analog değerlendirme: Düşük seviye sinyallerini yükseltmek (büyütmek) ve korumak için.
- (6) Digital değerlendirme: Sinyali değerlendirmek için donanım (hardware) data analizi için yazılım (software).

Eğer küçük bir test parçası yerine bir yapı test edilecekse yapı mühendisliğinin bir değerlendirmesine ihtiyaç vardır.

4.1.1. Malzeme boyutu

Akustik emisyon malzemeler açısından çok duyarlı bir yöntemdir. Örneğin, alüminyum alaşımlarda akustik emisyon karakteristikleri sadece bileşime değil, kesme ve yaşlanmaya bağlıdır. Model belirleme teknikleriyle ilişkili olan akustik emisyon, değişik kompozit malzemelerin incelenmesinde yardımcı olarak kullanılmaktadır.

Bu tekniğin mikro yapılardaki farklılıkları belirlemedeki gücünü göstermektedir. Bu tekniğin dezavantajı ultrasonik yöntemlerdeki gibi uluslararası bir kalibrasyonun olmamasıdır. Fakat burada standart yansıtıcılar kalibrasyon için referans olarak kullanılabilirler [14,15]. Her malzemenin akustik emisyon sonucu ayrı ayrı alınmalıdır. Akustik emisyon karakteristikleri deformasyon süreçlerinin çözümlenmesinde yardımcı olurlar. Yumuşak çelik gibi esnek malzemelerde emisyon faaliyeti ürün etrafındaki bozulma hareketlerinin sonucu olarak oluşur. Bu emisyon ile yük değerlerinin oluşturduğu noktalar arasında düzenli bir grafik oluşturur ve burada bu oluşumların sebebinin çok sayıdaki küçük olaylar olduğunu gösterir (şekil 4.2.a).



Şekil 4.2. Akustik emisyon faaliyetinin gösterimi (a) Sünek malzemeler için (b) Gevrek malzemeler için [14]

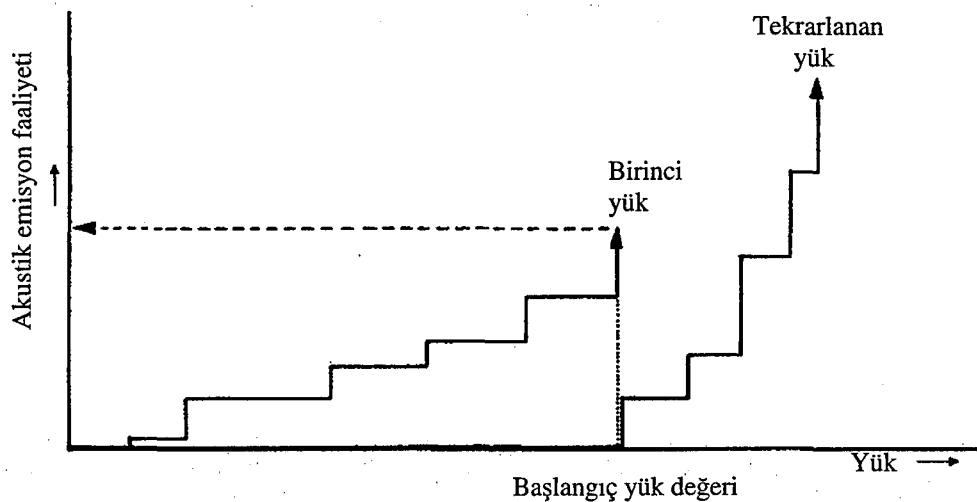
Seramik gibi gevrek malzemelerde, akustik emisyon faaliyeti genelde çatlak oluşumu ile ilgilidir. Bu emisyonun yük değerlerine karşı kademeli olarak ilerlediği bir grafik ortaya çıkartılır (şekil 4.2b). Bu da daha az sayıdaki yüksek enerji olaylarını gösterir.

Böylece akustik emisyon sonuçları, değişik deformasyon mekanizmalarının ayrılmaları ve tanımlanmalarında yardımcı rol oynarlar.

Kompozitlerin karışık bir bozulma ve hasar işleyişleri vardır ve bu nedenle de karışık akustik emisyon sonuçları bulunmaktadır [14,16,17].

4.1.1.1. Kaiser etkisi / Uygunluk etkisi

Akustik emisyon değerlendirilmelerinde gözlenen önemli bir etki ‘‘Kaiser’’ etkisidir. Bu şekilde 4.3’de de gösterildiği gibi daha önceden ulaşılmış yük değerine kadar tekrar bir yükleme yapılırsa, bu ek bir akustik emisyon faaliyeti oluşturmaz. Bu basitleştirilmiş bir ifade olsa da, tekrar yükleme esnasında hiçbir ek hasarın oluşmadığı elastik limitleri içinde, ani yüklemelerin olduğu malzemeler için çok uygun işlemektedir. Daha genel bir kanıyı değerlendirecek olursak, akustik emisyon faaliyetinin arkasındaki iletici kuvvetin bölgesel gerilme olduğu mutlaka anımsanmalıdır. Üzerinde çatlak bulunan K_{Ic} numunesi gibi bir örneği inceleyecek olursak çatlak ucundaki bölgesel gerilmenin, makroskopik gerilme (örneğin yük/alan) ile mikroskopik gerilme şiddet faktörünün (örneğin çatlak geometrisi) bir ürünü olduğu anlaşılacaktır [14,16].



Şekil 4.3. Akustik emisyon faaliyetinin gösterimi (a) Sünek malzemeler için (b) Gevrek malzemeler için [14]

Eğer çatlak ilerlerse (örneğin yorulma ile), yük iletimi arasında ve daha sonra tekrar yüklemede çatlak ucundaki gerilme öncekinden daha yüksek olacaktır. Bunun sebebi gerilme şiddet faktörünün artmış olması ve bunun da

yenilenmiş akustik emisyon faaliyeti oluşturmasıdır. Bu, akustik emisyon bazlı periyodik inceleme programının temelini oluşturur.

Kaiser etkisi birçok duruma ayrılır: [14]

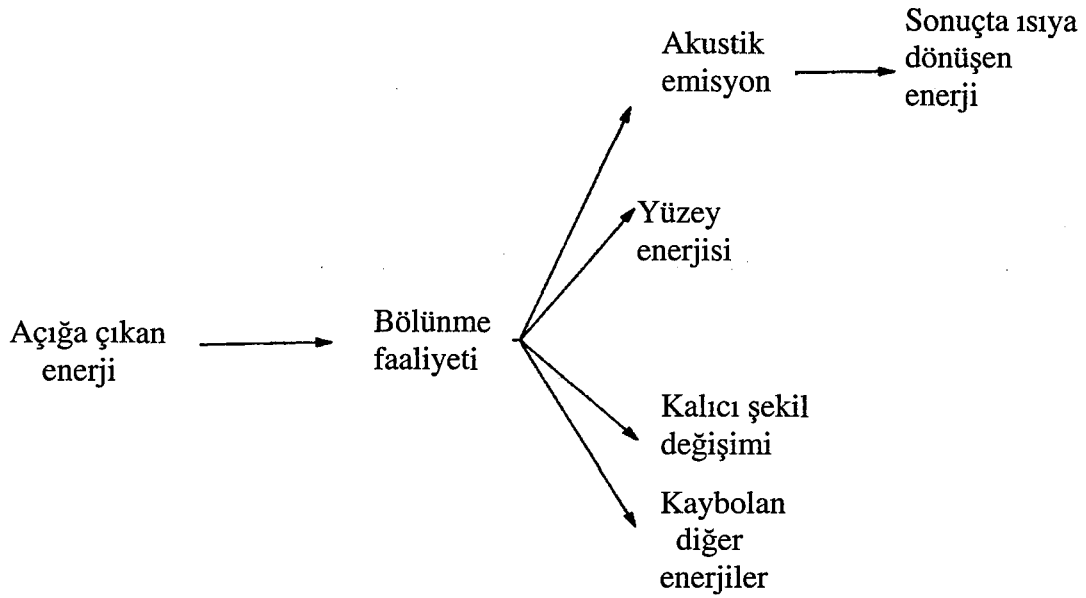
- 1- Malzemeler elastik sınırlarının dışında bulduklarında, deformasyon gibi zamandan bağımsız prosesler aktif hale gelirler.
- 2- Bir numune birçok fazda bulunabileceğinden, faz değişimleri her bir devirdeki akustik emisyon oluşumlarını değiştirebilir.
- 3- Hasar onarım mekanizmalarının geçerli oldukları yerlerde yükseltilmiş sıcaklıklarda çalışmalıdır.
- 4- Kaiser etkisi metaller üzerine yazılmıştır. Mikro yapıları ve deformasyon mekanizmalarıyla kompozitlerin, izotropik metallerle aynı durumda olmadıkları açıktır. Kompozitlerde kaiser etkisine uymayan bu durum "Uygunluk Etkisi" olarak adlandırılır. Bu faktörler gösteriyor ki tüm akustik emisyon faaliyetlerinde olduğu gibi malzemelerin yapısal yönleri bilinmelidir.

4.1.2. Bozulma mekanizmaları

Akustik emisyon faaliyetlerini yürüten güç, test parçası, komponent veya yapı içinde depo edilmiş enerjinin serbest kalmasından dolayı oluşur. Bu nedenle kırılma mekaniği ile yakından ilgili bir tekniktir. Fakat elastik şekil değişimi enerjisinin yanında geçerli başka enerji kaynakları da bulunmaktadır.

Akustik emisyon spektrumunda bazı diğer mekanizmalar da sinyal oluşumunu arttırabilirler. Bunlar kaçaklar, işleme veya makine gürültüsü olabilir. .

Bu değişik mekanizmaların bir çoğunda sadece açığa çıkan enerjinin küçük bir kısmı akustik emisyon dalgalarını oluşturmak için yeterlidir. Diğer enerji atıkları da açığa çıkmış enerji ile bağlantılıdır ve bazı bölünme (ayrılma) işlevi formları değişik enerji atıkları arasındaki geçerli enerji dağılımını belirlemektedir [14,17].



Şekil 4.4. Bölünme faaliyetinin gösterimi [14]

Meydana getirilmiş gerilme dalgası geçici bir olaydır; öyle ki zayıflamadan dolayı hemen ısı enerjisine dönüşür.

4.1.3. Akustik boyutu

Çatlak ucu etrafındaki gerilme alanı yeniden düzenlendiğinde, numunenin içinden geçen gerilme dalgası oluşur. Akustik yayılma biraz karışıktır ve şunları içerir: [14]

- (1) Değişik dalga tipleri.
- (2) Mod değişimi ve yansıması.
- (3) Zayıflama.
- (4) Dağılma (serpinti, ayrılma).

Birleştirilmemiş sonsuz bir katı cisimde boylamasına ve kesme dalgaları olmak üzere sadece iki dalga tipi gözlenir. Bu dalgaların yayılma hızları, katı cismin mekanik özellikleri vasıtasıyla belirlenir. Boş yüzeylerin bildirilmesiyle sınırlı durumların (şartların) oluşması, yüzey dalgaları, tabaka dalgaları ve kol

dalgaları gibi daha karışık dalgaların oluşmasını sağlamıştır. Bütün bunların yayılma hızı ve zayıflama gibi bireysel karakteristikleri vardır. Bu da farklı mekanik ve mikro yapı özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Örneğin, yayılma hızını gösteren en basit anlamdaki dalga, boylamasına kol (çubuk) modudur. Bunun hızı;

$$C(\text{rod}) = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4.1)$$

Burada E Young modülünü, ρ da yoğunluğu göstermektedir.

Serbest bir yüzeydeki yansımada, akustik dalgalar mod dönüşümüne maruz kalabilirler. Örneğin, bir yüzey üzerine düşen bir kesme dalgası, yansıyan kesme dalgasına ek olarak mod dönüşümüyle boyuna ve yüzey dalgaları oluşturacaktır .

Bu sinyal aynı zamanda ses zayıflaması ve ayrılması tarafından da etkilenir. Zayıflama frekansa bağlıdır. Daha yüksek frekanslarda, daha büyük kayıplar olmaktadır. Bazı modlar ayırıcıyken (örneğin farklı frekanstaki farklı hızlarda yayılırlar), bu iki faktörün etkisi sinyali alçaltmak, yükselme zamanını yavaşlatmak, darbe boyunu küçültmek ve pik genliğini zayıflatmaktır [14,16,17].

4.1.4. Sensör boyutu

Akustik emisyonunda yaygın olarak kullanılan sensörler yankı veren piezoelektrik bölümlerdir. Sonuçta, kompozitlerdeki akustik emisyon faaliyetlerini belirlemek için interferometri gibi optik teknikleri kullanılmasına yönelik çalışmalar da bulunmaktadır.

Özel durumlar için değişik frekanslar kullanılsa da genelde akustik emisyon çalışmaları düşük ultrasonik aralıklarda 100-500 kHz gerçekleştirilmektedir. Örneğin düşük frekans sensörleri yüksek zayıflama durumları için veya arka (alt) ses problemlerinden kaçmak için yüksek frekanslı sensörler kullanılmaktadır.

Çalışma frekansını seçmek birçok faktöre dayanmaktadır. Bunlar; altyapı çevre gürültü seviyesi, malzemenin zayıflama derecesi ve kaynağın frekans karakteristikleridir. Bir hızlı gerilme oluşumunda Fourier dönüşümünden de

anlaşılacağı üzere, genelde ses kaynağı geniş bantlıdır. Bu nedenle her bir sensörün ulaşmasını istediğimiz menzil gürültü seviyesiyle bağıntılıdır.

Toplam menzil incelenilen malzemenin zayıflama derecesine bağlı olacaktır. Metallerde tane boyutu dalga boyundan büyük olduğunda zayıflama hızlı bir şekilde artar. Kompozitler metallerle karşılaştırıldıklarında, birçok iç yüzeylerinin oluşu ve uygunsuz birleşme nedeniyle yüksek zayıflama seviyelerine sahip olma eğilimi göstermektedirler.

Genelde geniş bantlı ve yankı veren olmak üzere iki tip sensör bulunmaktadır. Geniş bantlı cihazlar, numunedeki ses yansımalarına (rezonansları) göz ardı etmek için mutlaka dikkat edilmesi gerekse de, spektrum analizleri için kullanılabilirler. Çoğu akustik emisyon uygulamaları yankı-veren (resonant) sensörler ile gerçekleştirilmektedir. Bunun dar bant uygulamalarına nazaran, azaltılmış altyapı gürültüleriyle birlikte yüksek duyarlılığa sahip olma avantajı bulunmaktadır (buradaki gürültü hem elektronik gürültüyü hem de çalışma bölgesindeki çevresel akustik altyapıları içermektedir).

Sensör kullanımında dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan biri sensör ve numune arasına uygulanacak akustik kuplajdır (coupling). Çelik/hava iç yüzeyine gelen gerilme dalgaları için enerjinin %99'u tekrar çeliğe yansıtılmaktadır. Eğer hava yerine su kullanılırsa enerjinin %90'ı su tabakası içine iletilmektedir [14]. Bu yüzden akustik kuplaj olarak reçineler, gresler ve yağlar kullanılarak gerilme dalgalarının numune içinden yayılarak sensöre iletilmesi sağlanmaktadır. Çoğu sensörler yaklaşık 2.5 mm çapında ve 2.5 mm uzunluğunda küçük silindirlerdir. Hatta küçük örneklerin üzerinde kullanılmak üzere minyatür sensörler daha uygundur. Sensörler hassas malzemelerden imal edildikleri için, genelde çok yüksek sıcaklıklarda kullanılmamaktadırlar. Eğer yüksek sıcaklıklarda test yapılması gerekiyorsa ya yüksek sıcaklık sensörleri kullanılır yada sıcaklık (termal) düşümü sağlayan dalga-kılavuzları kullanılmalıdır. Fakat her iki çözümde de duyarlılık azalmaktadır [14,17].

4.1.5. Sinyal oluşturma (Analog/ sürekli)

Sensörden yayılan sinyal genelde bölgesel bir yükselticiye (amplifikatöre) gönderilir ve bu da üç önemli işlevi yerine getirir: [14]

- (1) Sinyali daha az etkilenebilir bir seviyeye getirmek için (zellikle 40-60 dB (100-1000 kere) yükseltmek, böylece biraz kazanç sağlamak.
- (2) Sensörün alışma alanı dışından gelen gürültüyü engellemek için filtreleme sağlamak.
- (3) Yüksek empedanslı alıcıyı durumu çizerek gösterecek şekilde ayarlamak.

Daha sonra da sinyal, sensörden birkaç yüz metre uzakta olan ana yükselticiye gönderilir. Bu yükseltici sinyali yükseltmek için ek kazanç sağlamaktadır. Ana yükseltici 60 dB'lik ek bir değer sağlar.

Ana yükselticiden gelen analog dalga-formu bir osiloskopta görüntülenebilir. Sonuçta, bu durumdaki analog çıktının görüntülenmesi için bir katot işınlı osiloskobun kullanılması tavsiye edilmektedir. Eğer katot işınlı osiloskop görüntüsü incelenirse, gerekli iki akustik emisyon rejiminin olduğu gözlenecektir [14,15,16].

1. Sürekli faaliyet

Bu "sabit-durum" faaliyetidir. Genelde akustik emisyon bant genişliğinde elektronik sesin bileşimi çevresel akustik sesle birleşir. Bu sürekli faaliyet ortalama karekök alma (root-mean-square) teknikleri ile analiz edilir. Bu sinyalin alt seviyelerindeki değişiklikler için oldukça duyarlı olacaktır. Bu kılcal sızıntıları ve plastik deformasyonu tespit etmek için kullanılır.

2. Kırılma faaliyeti

nceki faaliyetin üzerine eklenecek olan faaliyet kırılma faaliyetidir. Bu kırılma malzeme içinde oluşan süreksiz mikromekanik olaylara uymaktadır. Bu kırılmalar rastgele zamanlı ve boyutlu olma eğilimindedirler ve bu da onları sürekli faaliyetlerden ayırmaya yaramaktadır. Bu da genelde bir eşik değeri kullanılarak sağlanır; yani sadece eşik değerini geçen olaylar değerlendirilir. Ses

seviyesi deęiŖeceęinden, kırılma olaylarını çözebilmek için bazı ekipmanlarda deęiŖen eŖik değerleri kullanılmaktadır.

4.1.6. Sinyal oluŖturma (dijital)

Kırılma dalga formu üzerinde dijital ölçümler yapmak için birçok deęiŖik dalga formu bulunmaktadır.

1. Olayların sayılması

Bu yöntem sinyal analizlerinin en basit olanıdır ve her bir olay tek tek sayılmaktadır. Elektronik olarak bu genelde dijital olarak elde edilir. EŖięi geçen bir dizi dalga belirlenen aralıktan daha geniŖ bir zaman aralığında incelenir ve bu daha sonra olayın sonunu göstermek için kullanılır.

2. Çağırmaların (ringdown) sayılması

Bu oldukça yaygın bir akustik emisyon sinyali değerlendirme tekniğidir. Bir olay ses dalgası sensöre çarptığı anda, onun bir zil gibi çalmasını sağlar. Bunlardan eŖik değerini geçen her biri elektriki dalga formu sayılır. Sensör kapatıldığında titreŖim tam olarak yorumlayıcı bir görünümde zayıflar. Bu çağırma seslerinden dolayı çağırma sayması ismini alır. Çağırma saymaları olay içerisindeki enerji hakkında bir fikir vermektedir; fakat bu enerjinin tam doğru ölçümü değildir.

Bazen saniyedeki çağırma sayıları gibi sayma oranlarına bakmak faydalı olur. Özellikle yüksek sesli durumlarda bu alt yapı seslerinin akustik emisyon titreŖimlerinden daha kolay bulunmalarını sağlayacaktır [14,18]. Benzer bir görünümde, Ŗekil deęiŖimi veya kesme parametrelerinin artıŖına göre grafiği çizilmiş olan sayımlar, zaman veya yük değerlerine göre çizilmiş olan sayımlardan daha açıklayıcı olmaktadır.

3. Genlik analizi

Bu daha karıŖık analiz metodudur. Bu durumda her bir olayın pik genliği ölçülür. Sonuçlar daha sonra ya bir yoğunluk ya da bir toplanmıŖ grafikler olarak

toplanmış bir şekilde gösterilir. Bu değişik mekanizmalar arasında değiştirilebilen kuvvetli bir metodudur.

4. Enerji analizi

Bu nadiren kullanılan bir metodudur. Bir olayın enerjisi ya direkt olarak ölçümlenebilir yada başka parametreler yardımıyla hesaplanılabilir. Genelde kullanılan böyle bir yaklaşım şudur : [14]

$$\text{Enerji} = 1/2 V_{\max}^2 \times t \quad (4.2)$$

5. Olay zamanı

Bu zaman olayın (zarfının) eşik değeri üzerinde kaldığı zamandır. Bu çağrılmaların sayılması ile yakından ilişkilidir; öyle ki bir sensörün titreşim periyoduyla çağırılma sayılarının çarpımına yaklaşık olarak eşittir.

6. Yükselme zamanı

Bu zaman sinyalin eşik değerinden pik değerine ulaştığı andır. Bu parametrelerin bazıları akustik emisyon faaliyetlerinin değerleri olarak direkt kullanılmazlar; fakat farklı mekanizmalardan gelen katkıları ayırmak için kullanılırlar. Örneğin, korozyondan kaynaklanan yayılımla, çatlak oluşumundan kaynaklanan yayınımdan farklı olması beklenir. Eğer bu değerler tanımlanırsa ve eğer bunlar eş zamanlı çalışıyorlarsa, her iki mekanizmada olan katkıların ayrılması gerekmektedir. Genelde bu rolde, yükselme zamanı ve olay zamanı oldukça yaralı olmaktadır. Bunlar ayrıcalıklı bir “pencerenin” oluşturulmasında kullanılırlar.

7. Kaynak yerleşimi

Şu ana kadar olan sinyal analizleri tek kanallı ekipman üzerine odaklanmıştır. Fakat akustik emisyonun kuvvetli yanlarından bir tanesi akustik emisyon faaliyetleri için olan kaynakların çok kanallı ekipmanlar kullanılarak yerleştirilebilmeleridir. Bu sensörler sırasına sahip olmayı ve geliş zamanlarını

farklı sensörlerde ölçmeyi gerektirir. Öncelikli olarak sensör çiftleri arasındaki ulaşma farklılıkları olan Δt 'ler ölçülür. Üçgenleme (nirengeleme) teknikleri kullanılarak kaynağın pozisyonu hesaplanabilir. Bu işlemler için gerekli olan alet hesaplamaları yapacak olan bir bilgisayardır. Akustik emisyon olaylarının küçük bir alanda kümeleşmeleri, yapı içerisine yerleşmiş bir anormalliğin en iyi göstergesidir.

8. Ekipmanların (araç-gerecin) seçilmesi

Akustik emisyon genelde sinyal ve ses arasındaki bir mücadeledir. Başarıyı elde edebilmek için sinyal en iyi şekilde alınır ve sesin etkileri en aza indirgenerek akustik olaylar ve veri analizleri yapılır. Kullanılan teknikler şunları içerir [14,18]:

- (1) Sensör frekansı ve bant genişliğinin seçilmesi.
- (2) Farklı sensörlerin ve yükselticilerin kullanılması.
- (3) Belirli bir eşik değeri kullanılması.
- (4) Özel pencerelerin kullanılması.
- (5) Bölgeselleşme ve kümeleşmenin kullanılması.
- (6) Gerekli olan daha başka bilgiler varsa onları da kullanmak.

Örneğin yorulma testinde, çapraz başlar hareket halinde ve tepe yük değeri ses seviyesi maksimumdayken gürültüde bir derinlik bulunmaktadır. İşte burada yorulma hasarının oluşacağı anda akustik emisyonun olayla ilgisi başlar. Burada tepe yük değeri etrafında akustik emisyon sistemi değerler alır ve sinyal değeri gürültü oranına göre ayarlanır. Bunu tamamlamak için kullanılan aracın adına voltaj kontrollü kapı (klit-entegre) denilir ve yük hücre sinyali ile harekete geçirilir.

Daha birçok temel çalışmalar için kullanılacak sinyal değerlendirme ve analiz etme teknikleri bulunmaktadır.

4.2. Değerlerin Kaydedilmesi

Bir sistemin sonuç değerlendirme imkanları, onun karmaşıklık derecesini gösterme eğilimidir. Sonuç değerlendirme birçok sınıfta toplanmıştır.

1. Analog anında görüntü (on-time)

Gelişmiş bir video teyp kullanılarak ana yükselticiden gelen analog sonucunu kaydetmek mümkündür. Bu yaklaşım, bu cihazların limitli dinamik menzilleri olması açısından dezavantajlıdır.

2. Dijital anında görüntü

Geçici bir kaydedici veya A-B dönüştürücüsü kullanılarak, sinyal dijital olarak yakalanabilir. Buradaki fark hızlı örnek oranı ve geniş bir dinamik menzilin olmasıdır. Bu da fazla depolamaya neden olan işlenmemiş bilgi anlamına gelir. Fakat bunlara rağmen en kısa yöntemdir.

3. Analog işlenmiş bilgi

Çoğu basit tek kanallı birimler iki boyutlu yazıcılara veya metin yazıcılarına analog çıktılar sağlayacaklardır.

4. Dijital işlenmiş bilgi

Çoğu bilgisayar destekli ekipmanlar her bir bağımsız olay için akustik emisyon özelliklerini bir disk üzerine kaydedebilirler. Bu test düzeneğini veya parametrelerini değiştirerek tekrar inceleme yapma kolaylığı sağlayacaktır.

4.3. Akustik Emisyon Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Akustik emisyon yönteminin başlıca avantajları şunlardır: [14,16,17]

1. Kullanılan ekipmanın ucuz olması.
2. Portatif cihazların kullanılabilmesi.
3. Geniş yüzeylerin kısa sürede kontrol edilebilmesi.
4. Küçük hata ve süreksizliklere duyarlı bir yöntem olması.

Akustik emisyon yönteminin dezavantajları şu şekilde özetlenebilir:
[14,16,17]

1. Karışık sonuçlar içermesi ve dolayısıyla sonuçların yorumlanmasının deneyim ve yeterli bilgi-beceri gerektirmesi.
2. Değerlendirmeler için özel bilgisayar programlarına ihtiyaç duyulması.

4.4. Ultrasonik Kontrol Yöntemi

Temel olarak ultrasonik kontrol yönteminde malzeme içine gönderilen ultrasonik titreşimlerin uğradığı değişimler test sistemi tarafından algılanır ve sonuçta malzeme hakkında bir takım veriler elde edilir. Malzemeye ultrasonik titreşim adı verilen ses dalgaları gönderilir. Bu titreşimlerin geri yansımalarının tanımlanabilir ve yorumlanabilir olması gerekir [14,16,17,18].

Ultrasonik dalgalar mekanik dalgalar olup, bir prop sisteminden test parçası içine yayılırlar. Fiziksel olarak insan kulağının işitebileceği maksimum ses frekans şiddeti olan 20 kHz üzerindeki seslere “ultrasonik ses” ismi verilmektedir [14,18].

Ultrasonik test cihazında elektriksel olarak üretilen yüksek frekanslı sinyaller, genel olarak piezoelektrik sinyallerden yapılan proplar aracılığıyla malzeme içine “ultrasonik dalgalar” olarak gönderilir. Maddesel ortamda doğrusal olarak yayılan bu dalgaların önüne malzeme içindeki herhangi bir süreksizliğin çıkması halinde dalgalar yansıyarak yön değiştirir. Bu yön değiştiren dalgalar ya aynı yada farklı bir propla algılanarak tekrar elektrik sinyallerine çevrilir ve ultrasonik cihaz ekranında görüntü haline dönüştürülür. Ultrasonik test cihazı ekranındaki sinyaller, deneyimli bir gözlemci tarafından yorumlanarak, sinyalin oluşmasına neden olan süreksizliğin boyu ve bulunduğu konum tespit edilir.

Ultrasonik dalgalar parça içinde ilerlerken ara yüzeyler ile farklı akustik empedanslarla karşılaşır (yoğunluk ve akustik hız). Malzeme içindeki akustik empedans uyumsuzluğu, ultrasonik dalgalarda enerji kaybına karşılık gelen yansımalara neden olur. Bu farklılık nedeniyle yansımaların sebebi, parçanın üretim aşamasında gördüğü işlemler ve servis ömrü boyunca oluşan süreksizlikler ile ilgilidir. Bunlara örnek olarak döküm parçalarda sıklıkla karşılaşılan çekme boşlukları, cürufklar ve kalıntılar, kaynaklı parçalarda görülen kaynak dikişindeki kaynamama problemi, kesim ve delik hataları, korozyon oluşumları, ısı işlemlerden kaynaklanan hatalar, parçanın servis sırasında gördüğü hasarlar, yüzeyel bozukluklar ve yorulma olayı verilebilir [15,16,18].

Tahribatsız muayene yöntemlerinde iki temel ultrasonik test sistemi kullanılmaktadır. Bunlar darbe-yankı ve direkt-iletim metotlarıdır [18].

4.4.1. Darbe yankı sistemi

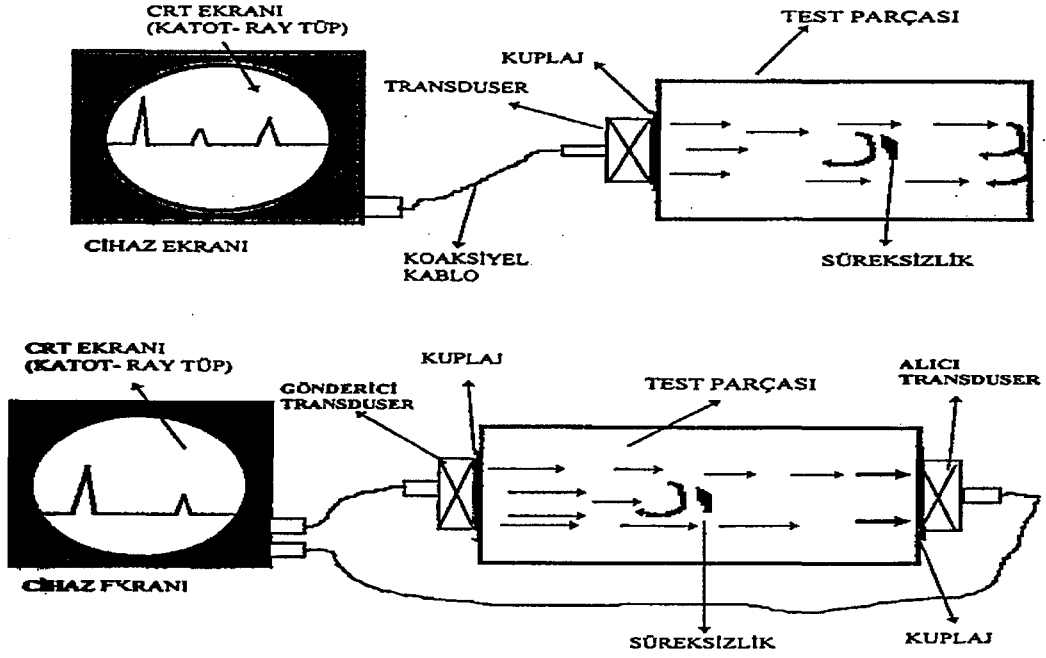
Ultrasonik kontrollerde en yaygın olarak kullanılan metottur. Bu metotta test parçasının içinden kısa eşit aralıklı darbeler şeklindeki ultrasonik dalgalar gönderilir. Bu darbeler yolları üzerindeki boşluklardan veya çarptıkları malzemelerin sınırlarından yansır. Algılanan yansıma veya yankılar daha sonra katot ışını tüpü üzerinde gösterilirler. Katot ışını tüpü, materyal içindeki ilerleme zamanına ve yansımanın genişliğine ait yaklaşık bilgileri verir. Tek bir dönüştürücü (transducer) hem alıcı hem de verici olarak kullanıldığı gibi bazen iki dönüştürücü birisi verici diğeri ise alıcı olmak üzere kullanılabilir [14,17,18].

4.4.2. Doğrudan iletim sistemi

Ultrasonik kontrollerde daha az sıklıkla kullanılan sistem ise direkt-iletim sistemidir. Direkt-iletim sistemi iki adet dönüştürücü kullanımını gerektirmektedir. Dönüştürücülerden bir tanesi verici olarak malzeme yüzeyine konarken diğeri dönüştürücü ise alıcı olarak malzeme tabanına yerleştirilerek kullanılır [14,17,18]. Darbe-yankı sistemindeki gibi malzeme içinden kısa darbeler halinde ultrasonik dalgalar geçirilir. Ancak bazen sürekli dalgalarda kullanılır.

Darbe-yankı sistemine benzer olmayan bu sistemde, yankının verici dönüştürücüye geri dönmesi işlemi kullanılmaz. Böylece bir çatlak veya süreksizliğin derinliği tespit edilemez. Alıcı dönüştürücü, malzeme içinden direkt (veya dolaylı) olarak geçen ses dalgalarını toplayabilmek için verici dönüştürücüye göre ayarlanır.

Direkt iletim sisteminde malzeme içindeki süreksizlikler alınan enerjinin yükseltisindeki değişikliklere bağlı olarak değerlendirilir [18]. Yükseltideki sönümlenme, ses denetiminde zayıflamaya neden olan olası bir süreksizliği gösterir. Ancak süreksizliğin derinliğine ait herhangi bir gösterge ve bulgu elde edilemez.



Şekil 4.5. Ultrasonik test düzeneği [18]

4.4.3. Ultrasonik kontrol yönteminin avantaj ve dezavantajları

Ultrasonik kontrol yönteminin başlıca avantajları şunlardır: [14,15,17,18]

1. Uygulamaların düşük maliyetli olması.
2. Portatif cihazların bulunması.
3. Küçük hasar ve süreksizliklere duyarlı olması.
4. Geniş yüzeylerin kısa sürede, doğru olarak taranabilmesi.

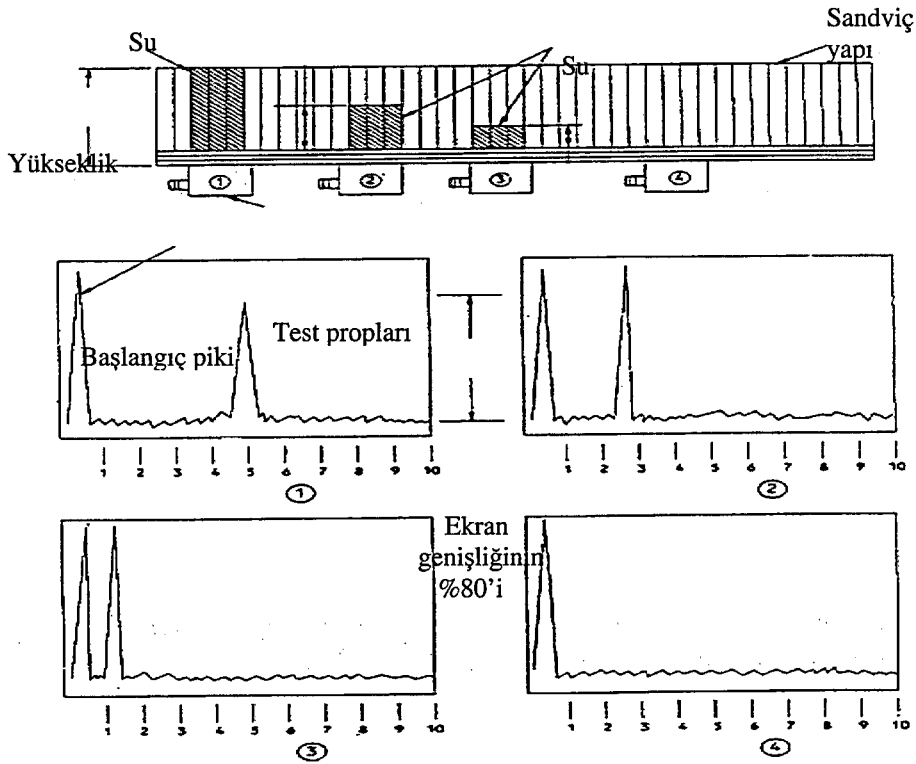
Avantajlarının yanı sıra bu tekniğin bazı dezavantajları şu şekilde özetlenebilir [14,15,17,18].

1. Sonuçların karışık olması ve yorumlayıcı personelin özel, deneyimli ve iyi bilgi- becerisinin olması gerekliliği.
2. Değerlendirmelerin bilgisayar ortamında yapılması.
3. Kuplaj denilen test parçası ile test cihazı arasındaki yüzeyde kullanılan bir ara ortama ihtiyaç duyulması.
5. Test yüzeyi ve karşı yüzeyin açık olma gerekliliği

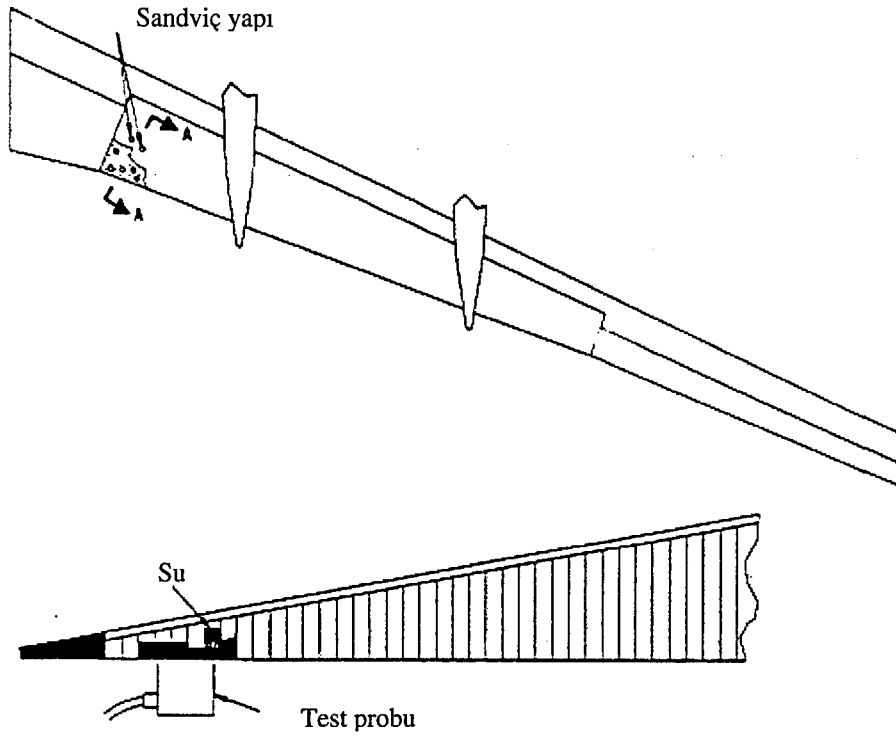
4.5. Uçaklarda Akustik Emisyon ve Ultrasonik Kontrol Tekniklerinin Sandviç Kompozitlere Uygulaması

Akustik emisyon tekniğinin uçaklardaki uygulama alanları yavaş yavaş gelişmeye başlamıştır. Genelde laboratuvar çalışmalarında kullanılmakta olan bu teknik günümüzde uçak bakım hangar ve atölyelerinde kullanılmaya başlanmıştır. Gelişen teknoloji ile birlikte klasik tahribatsız muayene yöntemlerinin yerini alan birkaç yeni teknikten biri olan akustik emisyon tekniği sandviç yapıların kontrolünde de oldukça etkin bir yöntemdir. Yapı içinde ve yüzeylerde oluşan kılcal çatlakların tespiti bu teknikle kolaylıkla yapılabilir.

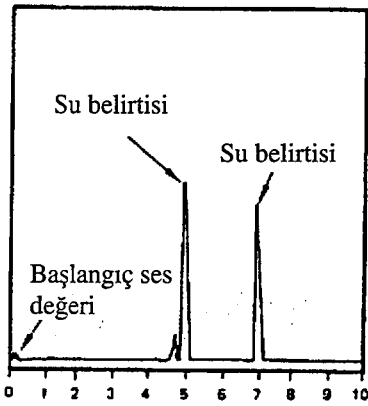
Ultrasonik kontrol yöntemi de bir akustik tahribatsız muayene tekniği olup, yapı içine gönderilen ses dalgalarının yorumlanmasına dayanır. Şekil 4.6-4.8'de akustik emisyon tekniğinin sandviç kompozitlere uygulama örnekleri verilmiştir.



Şekil 4.6. Ultrasonik yöntemle kanat yapısında sandviç kompozit yapı içindeki suyun tespiti [17]



Şekil 4.7. Ultrasonik kontrol tekniği ile Boeing 737 uçağının flabında bulunan sandviç kompozit yapının kontrolü [17]



Şekil 4.8. Ultrasonik kontrol tekniği ile Boeing 737 uçağının flabında bulunan sandviç kompozit yapı içindeki suyun tespiti [17]

5. TERMOGRAFI

Uçuş emniyeti ve ekonomik nedenlerden dolayı, herhangi bir riske neden olmadan uçakların servis ömürlerinin arttırılması günümüzde üzerinde yoğunlaşılacak bir konu haline gelmiştir. Uygulanılan yanlış perçinleme yöntemleri, yorulma ve korozyon gibi faktörler uçakların yapısal mukavemeti ve dolayısıyla da yapının servis ömrünü kısaltacaktır. Günümüzde hasarları en kısa sürede ve doğru olarak belirleyecek yeni hasarsız kontrol yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Termografi bu yeni tekniklerden biridir ve uçak komponentlerindeki süreksizliklerin hızlı ve güvenilir bir şekilde tespitini sağlar. Özellikle sandviç kompozit yapılarda oluşan su, nem, korozyon, yorulma çatlakları ve yüzey malzemelerinin yapıdan ayrılması gibi süreksizliklerin tespitinde en uygun tahribatsız muayene yöntemidir [19,20,23,24,].

5.1. Termografi Yönteminin Temel Prensipleri

Termografi, kızılötesi kamerayla yüzeyde gözlenen sıcaklık değişikliklerinin izlenmesi yoluyla, yüzey altı süreksizliklerin bulunmasını sağlar [19].

Termografi yöntemi ile parçanın hasarlı yüzeyinde oluşan sıcaklık farkları yardımıyla çatlakların yeri tespit edilir. Isı parçaya uygulanır, sonra film veya enfra kızılötesi kamera kullanılarak sıcaklık farkları adım adım ölçülür. Termografi yönteminin uygulanabilmesi için, test numunesinin termik öz iletkenlik bilgilerinin bilinmesi gerekir.

Termal kontrolün temel prensibi; test parçasından veya test parçasına doğru ısı akışı sağlandığında oluşan yüzey sıcaklığının haritasını veya ölçümünü içerir. Bir yüzeydeki ısı farklılıkları veya zamanla yüzey ısısındaki değişimler ısı akımının yönüyle ilişkilidir ve kusurların tespitinde veya test parçasının ısı karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılır [14,19-21].

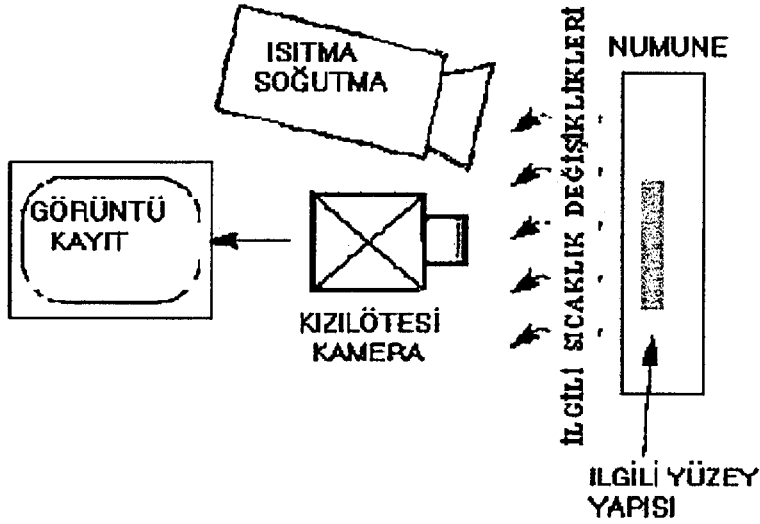
Bu kontrol yöntemi genel olarak şu şekilde özetlenebilir: Malzeme içinde yüksek güçte bir aydınlatma ile oluşturulan ısı dalgaları yayılır. Bu ısı enerjisi yüzeyde geniş bir alana düzgün bir biçimde yayılır. Daha sonra malzeme içinde

sıcaklık basamakları oluşturur. Buna termal dalgalar denilebilir. Malzeme içinde herhangi bir düzensizlik mevcut ise ısı dalgaları bu bölgelere geldiğinde saçılır veya yansır. Saçılmanın derinliğine bağlı olarak bir zaman gecikmesi oluşur. Bu gecikme sonucu yüzeyde yerel soğumalar meydana gelir. Yüzey sıcaklık dağılımı ile malzemenin iç yapısı belirlendiği gibi yerel soğumalar ile de hata derinliği tespit edilebilir. Bu sistemlerde malzemenin iç yapısının görüntüsü termal kameralar ile kaydedilip, veriler bilgisayar ile değerlendirilebilir. Ayrıca bu sistemlerde fotoğraf görüntüsü elde etmek de mümkündür.

Termografi izotermilerin (eş ısı eğrisi) haritasıdır. Isıya duyarlı malzemeler ve araçlar sıcaklık değişimindeki düzensizlikleri tespit etmek için kullanılırlar. Bu gibi düzensizliklerin sebebi yapısal hatalardır. Termografi özellikle tabakalı yapıların kontrolü için uygundur. Tabaka içerisindeki ısı iletimini yapıdaki çatlaklar etkiler ve düzensiz bir yüzey sıcaklık profili ortaya çıkar. Tespit edilen tipik hatalar bağlantısız alanlar, darbe almış hücreler, çekirdeğin yüzeyden ayrılması ve petek yapılarda hücreler arasında nemin bulunup, bulunmamasıdır [19,20, 22-24].

5.2. Pasif ve Aktif Termografi

Termografi pasif ve aktif olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Pasif tasarımında, genelde çevreden farklı sıcaklıkta olan malzeme ve yapılar test edilirken, aktif tasarımda maksada uygun termal görüntüleri elde etmek için dışardan bir teşvik ediciye ihtiyaç vardır.



Şekil 5.1. Aktif termografi düzeneği [19]

5.2.1. Pasif termografi

Termodinamiğin birinci yasası enerjinin korunumu prensibini içerir ve entropi kanununa göre ısının büyük bir çoğunluğunun enerji harcayan prosesler tarafından serbest bırakıldığını belirtir. Bu yüzden ısı, uygun uygulamaları belirleyebilmek için gerekli bir parametredir. Pasif tasarımın yaygın uygulama alanları arasında binalar, bakım prosesleri ve ilaç endüstrisi sayılabilir. Pasif termografide, eğer sıcaklık değişimleri çevreyle uyumluysa, genellikle “delta-T” veya “sıcak hüzmeye (hot-spot)” olarak adlandırılır. 1.2 °C’lik bir delta – T şüpheli kabul edilirken, 4°C’lik bir değer anormal bir süreksizlik belirtisi olarak kabul edilir. Uygulamaların çoğunda amaç basitçe bozuklukların “go/no-go” (çalışır – çalışmaz) olduğuna karar vermek olduğu için pasif termografi oldukça kalitatifdir. Bu tip uygulamalar genellikle deneyimli kişiler tarafından deneysel kurallara dayandırılır. Ancak bazı incelemeler daha karışıktır ve nicel ölçümler üretirler. Bu tür durumlarda, direkt termal modellemesi gereklidir [14,19,21].

5.2.2. Aktif termografi

Tahribatsız muayenede aktif tasarımın bir çok uygulamaları vardır. Aktif termografiyi darbe termografisi, kademe-ısıtılması (step-heating), lock-in termografi ve vibrotermografisi (titreşim termografisi) olarak inceleyebiliriz [19,21,22].

5.2.2.1. Darbe termografisi

Temel olarak darbe termografisi numunenin ısıtılması ve daha sonra da sıcaklık azalış eğrisinin kaydedilmesinden oluşur. Nitel olarak olay şöyle gerçekleşir. Malzemenin sıcaklığı ilk termal dalgan sonra hızlı bir şekilde değişmeye başlar. Çünkü termal hareket, yüzey altında, difüzyon yoluyla ve hatta radyasyon ve konveksiyon kayıpları nedeniyle yayılır [25]. Bir süreksizliğin bulunması, difüzyon oranını azaltır ve böylece yüzey sıcaklığını gözlemlerken, süreksizlik bulunan alanlara bir kez termal hareket ulaştığında diğer çevre alanlara nazaran farklı sıcaklık alanları olarak yansır. Bundan dolayı derin süreksizlikler daha sonra gözlenecekler ve nitelikleri azalacaktır. Burada gözlem zamanı t , derinlik değeri z 'nin karesinin bir fonksiyonudur ve termal görüntünün (netliğin) kaybı c ise derinliğin küpü ile orantılıdır [19,22,26].

$$t \sim \frac{z^2}{\alpha} \quad \text{ve} \quad c \sim \frac{1}{z^3}$$

Burada α malzemenin termal yayılabilirliğidir.

Uygulamalar bu yöntemin iki kısıtlayıcısını ortaya çıkartmıştır. Gözlenebilir süreksizlikler genellikle yüzeyseldirler ve termal görüntü netliği zayıftır. Bir deneysel kurala göre belirlenebilecek en küçük süreksizliğin yarı çapı, bu süreksizliğin yüzeyden olan derinliğinden en az iki kat daha büyük olmalıdır. Bu kural homojen izotropik malzemeler için geçerlidir. Anizotropi durumunda ise sıkıntılıdır.

Bir çok uygulama yöntemi vardır. Bunlar nokta incelemesi (örneğin lazer veya odaklanmış ışık kaynağı ısıtması), çizgi (çubuk) incelemesi (örneğin çubuk lambaları, ısıtılmış tel, hava jet çizgileri, tarayıcı lazer ile ısıtma), yüzey incelemesi (örneğin lambalar, flaş lambaları, tarayıcı lazer kullanılarak ısıtma), ayrıca yansıtma (termal kaynak ve tarayıcı incelenecek parçanın aynı yüzeyine

konumlandırılmıştır) ya da iletimle (ısıtıcı kaynak ve tarayıcı parçanın karşılıklı yüzeylerine yerleştirilir) inceleme şeklindedir.

Eğer incelenecek bölümün sıcaklığı imalat yöntemine göre çevre sıcaklıklarından yüksek ise hava jetlerinin bir çizgisi gibi soğuk termal kaynak kullanılması daha kullanışlı olacaktır. Şüphesiz bir termal ilerleme sıcak ya da soğuk olsun aynı yolla yayılmaktadır. Burada önemli olan termal kaynak ile numune arasındaki sıcaklık farkıdır. Soğuk termal kaynağın diğer bir avantajı da, bir sıcak termal kaynağa olduğu gibi kızılötesi kamerada sahte termal yansımalara neden olmamasıdır.

Termografi bir nesnenin, ondan alınan kızılötesi radyasyon yardımıyla elde edilen canlı termal resminin oluşturulmasıdır. Darbe termografisinde incelenmek üzere bir termal darbe malzeme üzerine uygulanır. Bu termal darbenin uygulanmasına takiben, numune yüzeyinin sıcaklığının geçici gelişiminin ölçümü yüzey altı hataları ortaya çıkartacak kızılötesi kamera yardımıyla sağlanır.

İlk termal yayılımdan malzemenin sıcaklığı hızlı bir şekilde değişir. Çünkü hatanın varoluşu difüzyon oranını azaltır. Böylece yüzey sıcaklıklarını ölçümlerken süreksizlikler termal dalganın ulaştığı alanlara nazaran farklı sıcaklık alanları olarak belirirler. Sonuç olarak daha belirgin olan süreksizlikler daha sonra ve daha azalmış bir netlikle gözlemlenebileceklerdir [19,21,22,26].

İki tip gözlemlenebilirlik metodu mümkündür:

- a) Yansıma: Burada hem termal kaynak hem de tarayıcı ünite numunenin aynı yüzeyinde konumlandırılmıştır.
- b) İletim: Burada termal kaynak ve tarayıcı numunenin karşıt yüzeylerine yerleştirilmiştir.

Bu iki gözlemlenebilirlik metodu aynı oranda hata tespiti sağlayamaz. Yansımayla, daha büyük sonuçlar elde edilir. Fakat incelenen malzemenin kalınlığı küçüktür. İletim yoluyla daha büyük kalınlıkta malzeme kontrol edilebilir. Ancak derinlik bilgisi kaybolur ve sonuçlar zayıf olduğu için daha duyarlı tarayıcı cihazlara ihtiyaç duyulur.

Dahası da, özellikle çok katmanlı kompleks yapıların iletim metoduyla kontrolü her zaman mümkün değildir (örneğin petek paneller). Genellikle iletim yaklaşımı alt yüzeye yakın yerlere konumlanmış süreksizlikleri tespit etmeyi

sağlarken, yansıma yaklaşımı ısıtılmış yüzeye yakın bölgelere konumlanmış süreksizliklerin tespitinde iyi bir yöntemdir.

Darbe termografisi yöntemi havacılık alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle kompozit malzemelerin kontrolünde tercih edilen bir yöntemdir. Darbe termografisinin diğer yaygın kullanım alanları: Yüzey altı süreksizliklerin tespiti (çatlaklar, kılcal süreksizlikler, çarpma hasarları, nem), termofiziksel sıcaklık değerlendirmeleri ve tüm endüstri dallarıdır [25,26].

5.2.2.2. Kademe ısıtması (uzun darbe)

Sıcaklık azalmasının önemsiz olduğu darbe termografisine zıt olarak, burada artan yüzey sıcaklığı kademe ısıtması uygulaması sırasında görüntülenir. Zamanla yüzey sıcaklığındaki değişme numune nitelikleri ile ilgilidir. Bu teknik bazen zaman-kararlı kızıl ötesi radyometre (time resolved infrared radiometry) olarak adlandırılır. Bu yöntem kaplama kalınlık değerlendirmeleri (çok katmanlı katmanları da içerir) gibi uygulama alanları bulmaktadır. Örneğin deneysel bir bağıntı kaplama kalınlığı L' yi vermektedir [19].

$$t_c = \frac{0,36.L^2}{\alpha} \quad (5.1)$$

Burada t_c termal geçiş süresi ve α 'da termal yayılabilirlik olarak tanımlanır. Bu tür deneylerde kaplama numunesi ısıtılır ve sıcaklık zamanın kare köküne karşı eksen üzerinde çizilir. Termal geçiş zamanı eğrinin başladığı noktadan itibaren gözlenir. Deney düzeneği genel bir termografi düzeneği ile aynıdır; sadece deney süresince sabit olan ısıtma lazer kullanılarak sağlanır.

5.2.2.3. Lockin termografi

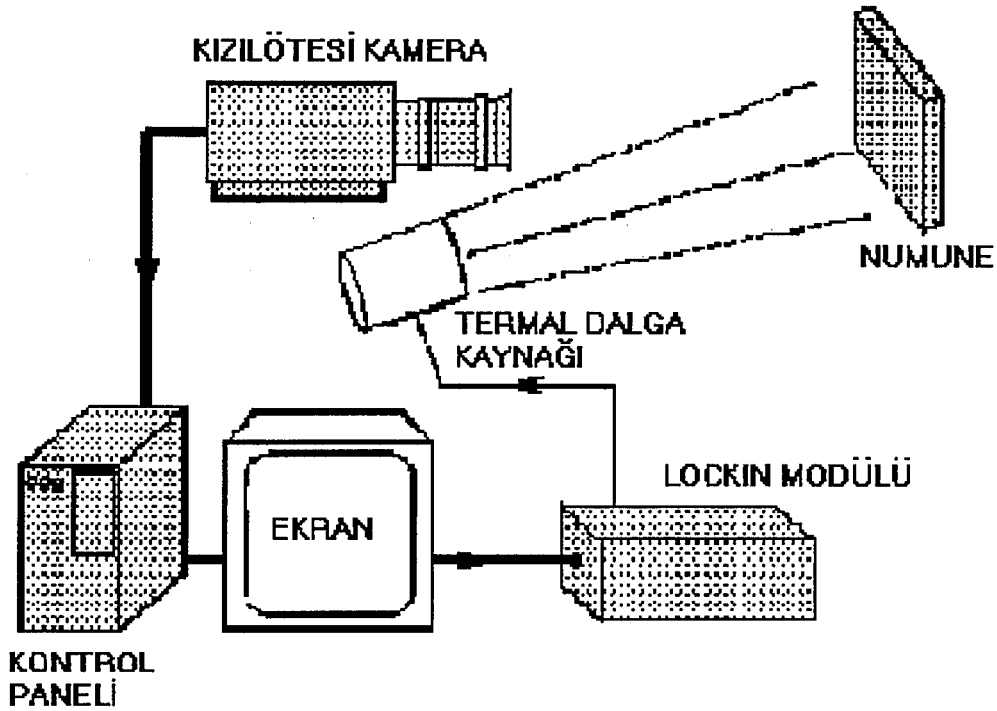
Lockin termografinin temel prensibi, dışardan incelenen parçanın yüzeyinden elde edilen sıcaklık motivasyonunun termal dalga olarak yayılmasıdır. Bu dalga diğer dalgalar gibi sınırlarda yansımalara uğrarken, yüzeydeki sıcaklık modülasyonu komponent içinden gelen termal dalgalar tarafından değiştirilir. Bu tip katılımlar için duyarlı bir gösterge, enerji azalması ve bölgesel termal tepki

arasındaki faz açısıdır. Eğer sıcaklık alanı değiştirilmiş bölge bir termografi kamerası ile görüntülenirse, her pikselde oluşturulmuş olan fourier analizi bölgesel tepkinin büyüklük ve fazını sağlayacaktır. Bu iki büyüklük başka bir görüntü çeşidi olarak anlamlı bir bilgi sunumu olarak kullanılabilir. Bu büyüklük görüntüsü homojen olmayan optik yüzey emişinden (absorpsiyonundan), kızılötesi yayılmadan ve optik aydınlanmanın dağılmasından etkilenir. Fakat görüntü evresinde her bir pikseldeki değerlendirme gerçekleştirilirken bu etkilerin her biri elenmektedir. Eğer modülasyon sinüsoidal yolla ele alınırsa, bu değerlendirme kısmen basit olacaktır. Çünkü ortalama alma prosedürleri yaklaşık bin adet termografi görüntüsünü sadece, fazla 90° dışarda faz görüntüsü φ olacak şekilde, 4 taneye indirilir [19,20,23].

$$\varphi = \arctan \frac{S_3 - S_1}{S_4 - S_2} \quad [20] \quad (5.2)$$

Burada $S_1 - S_4$ arası bahsedilmiş 4 görüntüyü gösterir. Bu sinüsoidal modülasyon, lambanın gücü yardımıyla termografi kamerasını kontrol eden bir bilgisayar tarafından yürütülen bir self-learning (öz-öğrenme) programı ile gerçekleştirilebilir. Termal dalgalar kullanılarak yapılan yüzey altı taramalarının menzili modülasyonun frekansına bağlıdır ve kara kökün tersi ile artış gösterir. Sinyal fazının mesafe olarak, büyüklükten 2 kat daha fazla avantajı vardır.

Lock-in termografi darbeli ısı kaynağı yerine sürekli sinus ısı dalgası kullanır. Nesne harmonik modüle edilmiş (sinüsoidal) ısı kaynağı ile aydınlatılır. Soğurulmuş ısı içerisinde yayıldığı ve fiziksel ısı yayılma parametrelerinin değiştiği parçalar üzerinde yansıdığı objenin yüzeyinde bir termal dalga oluşturur. İçeri giren ve yansıyan dalgaların karışması cisim üzerinde kızılötesi kamera ile belirlenebilen harmonik salınımlı (titreşimli) radyasyon paterni oluşmasını sağlar [20].



Şekil 5.2. Basit bir Lock-in termografi düzeneği [20]

Nesnenin yüzeyinde yüzey altı süreksizliklerinin üstündeki alanlar, yüzey altı süreksizlikleri olmayan alanlara nazaran farklı bir faz oluşturacaklardır. Lock-in sistemi ve yazılım, büyüklük ve faz bilgilerini değerlendirerek bu alanları tanımlar ve yerlerini belirler (çizimlerini yapar).

Bu teknik lock-in termografi ismini alır. Çünkü bütünlük içerisinde nokta nokta değerler alınır. Kısacası birçok nokta bir dalga çevrimi sırasında aynı anda kontrol edilir. Bu nedenle cihaz çok yönlü bir gözlem gerçekleştirir. Bu termografik ölçüm bölgesel termal dalga değişimlerini boyutsal veya fazsal olarak veren görüntüler sağlar.

Eğer görüntü kaydı modülasyon frekansıyla eş zamanlandırılırsa ve sistem bir çevrimde 4 görüntü alırsa, görüntünün her bir pikselinde S1, S2, S3 ve S4 olmak üzere 4 sinyal değeri elde edilir. Bundan sonra her dalga çevriminde, her bir görüntü pikseli 90° 'lik fazlarla değişen 4 zaman datası sağlar. Bu 4 datadan özel bir piksel için modülasyon yeniden oluşturulabilir. Bunun üzerine aşağıda gösterilen denklem 5.1 ve 5.2'yi kullanarak sıcaklık modülasyonunun bölgesel büyüklüğü ve fazı bulunabilir [19,21,22].

$$A(x_1) = \sqrt{(S_3 - S_1)^2 + (S_4 - S_2)^2} \quad (5.3)$$

$$\phi(x_1) = \tan^{-1} \frac{S_3 - S_1}{S_4 - S_2} \quad (5.4)$$

Gerçekte sistem faz açısı ve büyüklüğünün hesabı için 4 görüntü sayısından (S1, S2, S3 ve S4) daha fazla görüntü alır. Bir çok modülasyon çevrimlerinde toplam olarak çevrim başına 4 görüntüden daha fazlası elde edilir. Fakat sinusoidal modülasyonuna göre bütün görüntüler sonuç olarak sadece ana 4 görüntüye birleştirilirler. (S1, S2, S3 ve S4) bu görüntülerin faz açıları ve büyüklük değerleri denklem 5.3 ve 5.4'den elde edilir [19,21,22].

Termal dalga zayıflayacaktır ve dalga çevrim süresine bağlı olan belli bir derinliğe kadar nüfus edecektir. Dalga ne kadar yavaş olursa nüfuz yet o kadar derin olacaktır. Malzemenin özellikleri de (ısı iletkenliği, ısı kapasitesi ve yoğunluk) zayıflama için önemlidir. Büyüklük görüntüsünün menzili "termal derinlik menzili" μ olarak verilir [22].

$$\mu = \sqrt{\frac{2k}{w\rho c}} \quad (5.5)$$

Burada; k ısı öz iletkenliği, ρ yoğunluk, w modülasyon frekansı ve c de ısı kapasitesidir. Bu derinliğin dışında ısı dalgası genliği yüzey değerinin %37 oranında düşecektir.

Dalganın çevrim zamanının artırılmasıyla, nesne içinde daha derinleri tarayabilir ve tabakaları hakkında sonuçlara ulaşılır [22]. Aynı çevrim zamanlı genlik görüntüsüyle karşılaştırıldığında faz görüntüsü iki kat daha fazla derinliğe sahip olacaktır.

5.2.2.4. Vibrotermografi (titreşim termografisi)

Vibrotermografi yapıya dışardan uygulanan mekanik titreşimlerin etkisi altında, mekanik enerjiden termal enerjiye direkt dönüşümün olduğu ve ısının kesin olarak çatlak veya süreksizliklerin olduğu yerlerde sürtünmeden serbest kaldığı bir tekniktir. Mekanik uyarım frekansını değiştirerek (arttırarak veya

azaltarak) bölgesel termal meyiller özel rezonans frekanslarında ortaya çıkar veya kaybolur. Direkt modelleme bunun gibi uygun uyarım frekanslarını belirleme olanağı sağlar.

Bu yöntemde bir ultrasonik kaynak, numuneye tutturulur ve mekanik uyarım bununla sağlanır (tersine, numune bir ultrasonik banyoya daldırılabilir). Yüksek frekanslı ultrasonik sinyal (40 kHz mertebesinde), istenilen dalga boyunda bir termal dalga oluşturan düşük bir frekans sinyali ile modüle edilir. Bu teknik ultrasonik frekanslarda kayıp-açı ısıtması (loss-angle heating at ultrasonic frequencies) olarak adlandırılır ve bu teknik daha derin ve daha küçük süreksizlikleri tespit için kullanılır. Tipik uygulama alanları; korozyon, yatay çatlaklar ve kılcal süreksizliklerin tespitleridir.

Vibrotermografinin başlıca avantajları; diğer termografi yöntemleri ile zorlukla görülebilen süreksizliklerin tespit edilebilmesi ve geniş yapısal alanların kolaylıkla incelenebilmesidir [20,24].

5.3. Termografi Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Termografinin avantajları şunlardır: [19,20,22,24,25]

1. Hızlı gözlem (test) oranı.
2. Temas olmaması.
3. Güvenlik (yüksek güçle harici uyarıcılar kullanılmasına rağmen zararlı radyasyon içermez.).
4. Sonuçlar kolayca yorumlanabilir.
5. Geniş uygulama alanı.

Bu avantajlarının yanında termografi yönteminin birtakım dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir: [19,20,22,24,25]

1. Geniş bir yüzeye, kısa sürede, büyük miktardaki enerjiyi eşit olarak yayma zorluğu.
2. Termal görüntünün bozulmasına termal kayıpların etkisi.
3. Malzemelerin (ekipmanın) maliyeti.
4. Sadece termal özelliklerin değiştiği parçaların incelenebilme durumu.

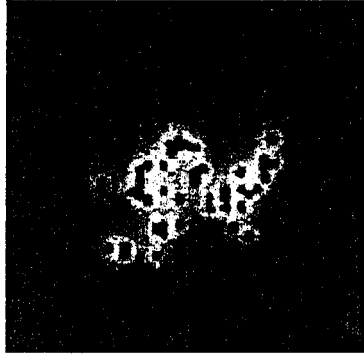
5. Yüzey altındaki sınırlı kalınlıkların incelenebilmesi (termografi sınırlı bir yöntemdir).

5.4. Uçaklarda Termografi Tekniğinin Sandviç Kompozitlere Uygulaması

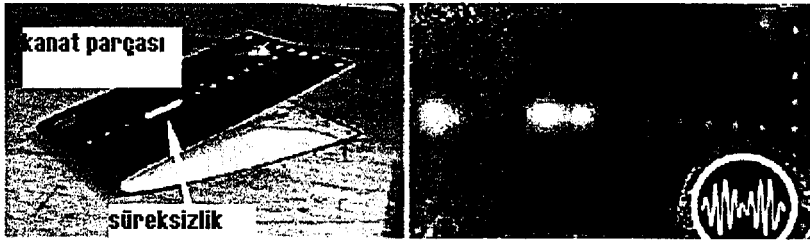
Havacılıkta bakım maliyetlerinin azaltılması ve uçuş emniyetinin sağlanması için günümüzde hasarsız kontrol yöntemlerinin önemi daha da artmıştır. Termografi yöntemi de gelişmiş bir hasarsız kontrol yöntemi olup, hızlı ve doğru sonuçlar sağlaması açısından günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hiçbir zararlı etkisinin olmayışı, geniş yüzeylerin kontrol edilebilmesi, uygulama kısıtlarının az oluşu ve elde edilen sonuçların kolaylıkla değerlendirilebilmesi termografinin havacılıktaki uygulama alanlarını, özellikle sandviç kompozit yapıların kontrolündeki uygulamaları genişletmiştir. Tüm tahribatsız muayene yöntemlerinde olduğu gibi bu teknikte de uygulayıcı personelin dikkati, bilgi birikimi ve tecrübesi ön plana çıkmaktadır.

Sandviç kompozit yapılarda özellikle iç yapı süreksizliklerinin tespiti oldukça güçtür. Termografi yöntemi ile iç yapı ve yüzeyde oluşan süreksizlikler kolayca tespit edilebilmektedir. Aşağıda termografi yönteminin sandviç kompozitlerdeki bazı özel uygulamaları verilmiştir.

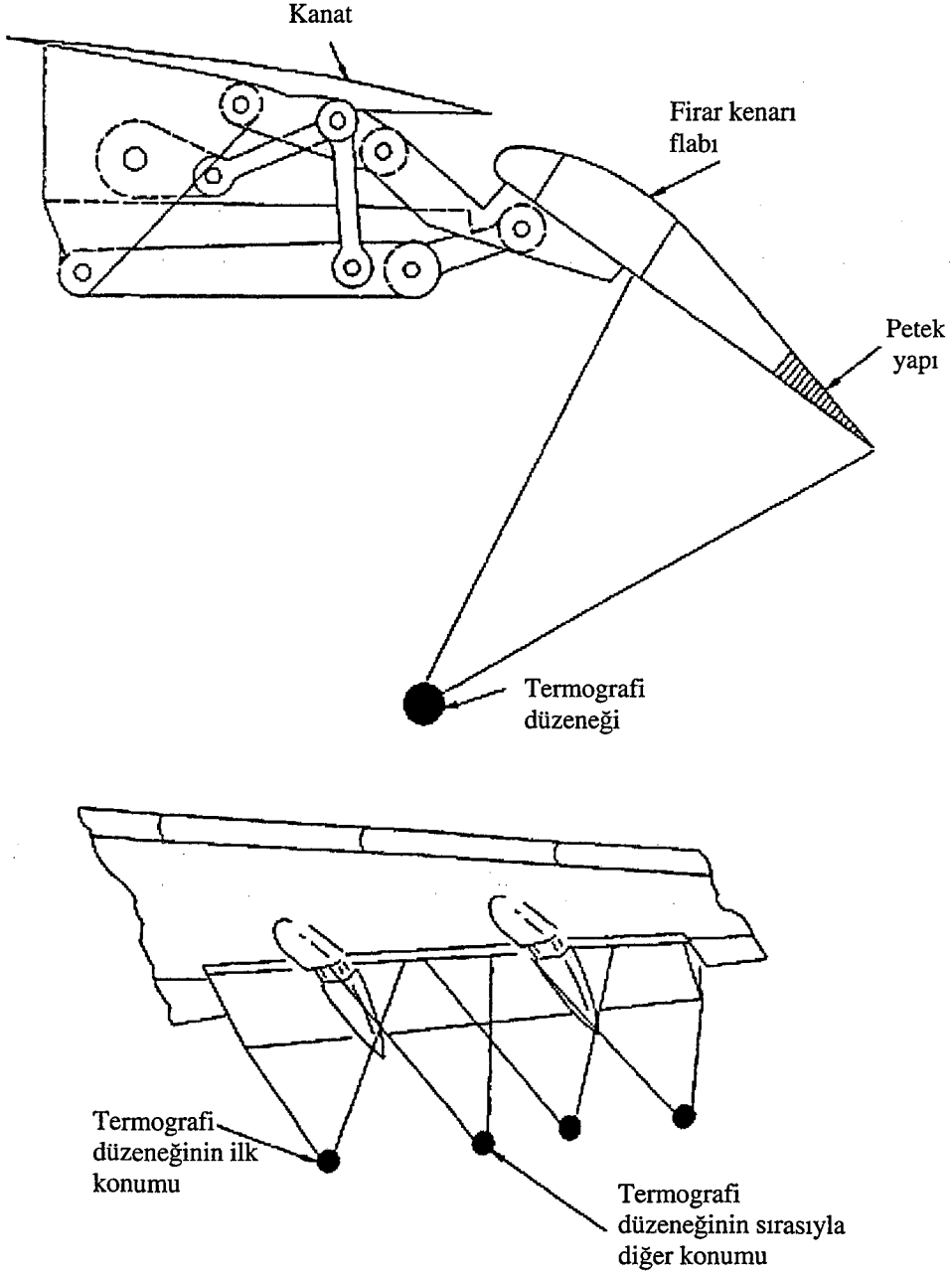
Sandviç yapılar düşük ağırlıkları ve yüksek dayanımları nedeniyle havacılık alanında yaygın olarak kullanılırlar. Buradaki kritik alan, yüzeyin alt kısmındaki yapıya bağlandığı bölgedir. Yapı içerisinde suyun yoğunlaşması bağlantının kalitesini etkiler. Bu da bağlantının zayıflaması dolayısıyla da dayanımın bölgesel olarak zayıflaması anlamına gelir. Bu yüzden yapı içinde suyun varlığının incelenmesi bakım açısından oldukça önemlidir. Şekil 5.3' de petek yapı içerisindeki suyun varlığının termografi yöntemi ile tespiti gösterilmiştir [21]. Şekil 5.3-5.7' de ise diğer uygulamalar görülmektedir.



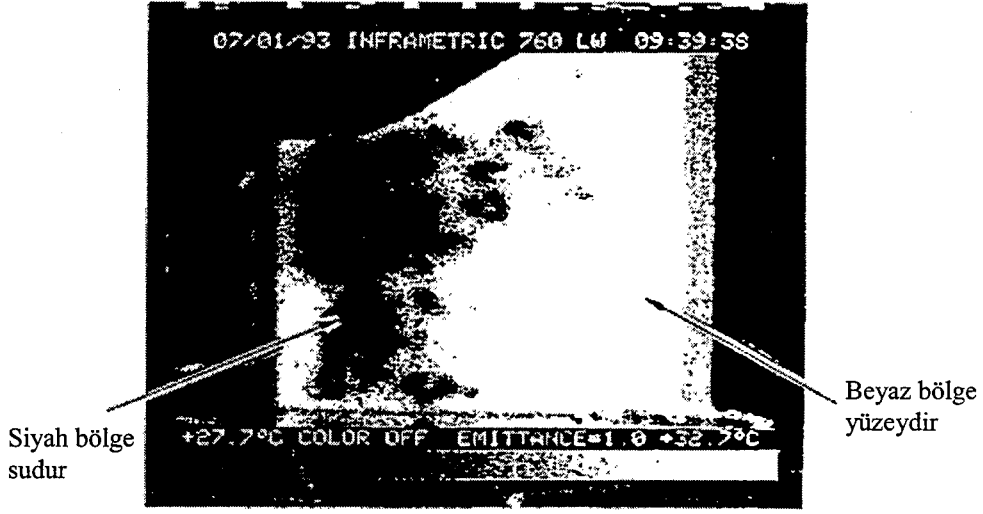
Şekil 5.3. Petek yapı içindeki suyun termografi yöntemiyle tespiti [21]



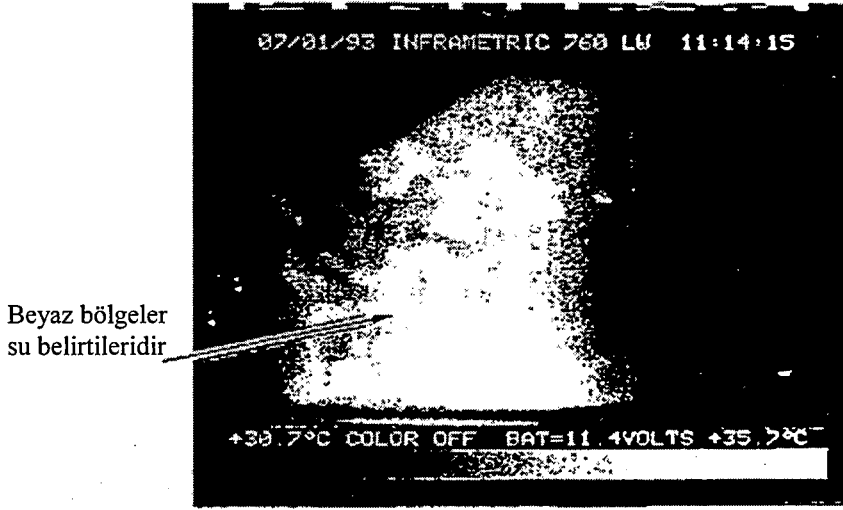
Şekil 5.4. Alüminyum uçak kaplamasındaki perçin deliklerinin termografi yöntemiyle kontrolü [21]



Şekil 5.5. Boeing 737-800 tipi uçağının fırar kenarı flabının uç kısmında bulunan petek yapıya termogرافي yönteminin uygulanması [17]

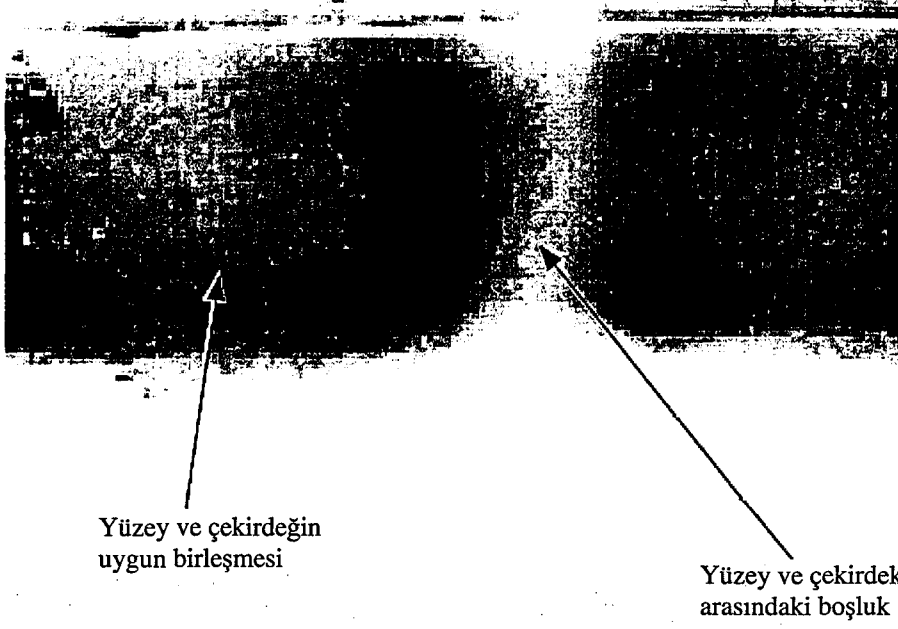


(a) Yüzey yapı içindeki sudan daha sıcak



(b) Yapı içindeki su yüzeyden daha sıcak

Şekil 5.6. Boeing 737-800 tipi uçağının firar kenarı flabının uç kısmında bulunan petek yapı içindeki suyun termografi yöntemiyle tespiti [17]



Şekil 5.7. Boeing 737-800 tipi uçağının irtifa dümeni üzerindeki petek yapıdaki bağlantı bozukluğu [17]

6. PENETRANT SIVI MUAYENE YÖNTEMİ

Uçak bakımında penetrant sıvı yöntemi, ilkel ve eski bir teknik olmasına rağmen vazgeçilemez hale gelmiştir. Uygulama prosedürünün basit olması, sonuçların kolaylıkla yorumlanabilmesi ve uçak üzerinde doğrudan kolay bir şekilde uygulanabilme imkanı olduğu için bakımlarda tercih edilen bir yöntem olma özelliği devam etmektedir.

Sandviç kompozitlerde penetrant sıvı kontrol yöntemi, yüzeye açık süreksizliklerin tespiti için kullanılır. Çünkü süreksizliğe ulaşarak nüfuziyeti sağlanan penetrant sıvısı yüzeye çekilerek belirti oluşturacaktır. Yüzey altında kalan süreksizlik, penetrant sıvısı ulaşamayacağı için tespit edilemez. Yüzey altında kalan süreksizliklerin tespiti radyografi, termografi ve akustik emisyon gibi diğer tahribatsız muayene yöntemleri ile mümkün olur [27,28].

6.1. Penetrant Sıvı Muayene Yönteminin Temel Prensibi

1900'lerin başında demiryolları işletim aksamaları olan lokomotif parçaları, dingiller, mil pimleri, bağlayıcılar ve rayların kontrolünde modern penetrant sıvı kontrol yönteminin temelini teşkil eden yağ ve beyazlatma yöntemi kullanılmıştır. Başlangıçta parçalar yüzey hazırlığı için kir, pas ve artık sıvanmalardan temizlenmek amacı ile yakıcı soda çözeltisinde kaynatılıp, kurutulurdu. Daha sonra parçalar penetrant olarak iş gören gaz yağı ile inceltilmiş koyu renkli makine yağının içine batırılıp, yağın süreksizliklere nüfuziyeti için birkaç saat bekletilirdi. Bekletme süresi bitiminden sonra, yüzeyde kalan fazla yağ, gaz yağı emdirilmiş bez ile tamamen temizlenirdi. Test parçası yüzeyi kurutulup, pudra veya tebeşir tozu serpilerek beyazlatma sağlanırdı. Varolan süreksizliklerin içine işlemiş yağ yüzeye geri çıkmaya başlar ve tebeşir tozu içinde görülebilir durumda kirli kahverengi süreksizlik lekeleri oluşurdu [27,29].

Penetrant sıvı kontrolü, devamlılık içerisinde, kesintileri tespit etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bir malzemenin yapısal bütünlüğünün bozulma nedeni, süreksizlik olarak tanımlanan; tabakalaşmalar, çatlaklar, dövme katlanmaları, dikişler, yabancı madde kalıntıları ve gözeneklerdir.

Penetrant sıvı kontrol yöntemi, aşırı derecede gözenekler içermeyen her metalik malzemeye (alüminyum, magnezyum, titanyum, demir, bakır, pirinç ve bronz gibi) ve metalik olmayan malzemelere (seramik, cam, plastik) uygulanabilir.

6.2. Penetrant Sıvı Kontrol Yöntemi ile Tespit Edilebilen Süreksizlikler

Penetrant sıvı kontrol yöntemi ile tespit edilebilen süreksizliklerden bazıları şunlardır: [27]

- Gözenekler
- Dikişler
- Isıl işlem çatlakları
- Dövme patlama ve çatlakları
- Soğuk yırtılma
- Çekme çatlakları
- Hava boşlukları
- Taşlama çatlakları
- Yorulma çatlakları

Penetrant sıvı kontrolünde bu tip süreksizliklere çok sık karşılaşma olasılığı vardır. Bu süreksizliklerin oluşumu ve şekillenme aşamalarını bilmek önemlidir. Haddeleme, dövme ve kalıplama sürecinde oluşan bazı süreksizlikler daima yüzeye açıktır.

Penetrant sıvı kontrol yöntemiyle belirtiler gözlemlenerek yerleri tespit edilir. Ürün meydana getirme esnasında kaynak işlemlerinde oluşan krater çatlakları da süreksizlik örnekleridir.

Servis süreksizlikleri olarak adlandırılan yorulma çatlakları sürekli kullanım yüzünden malzeme direncini kaybettiğinde veya aşırı yükleme yapıldığında oluşur. Malzemenin serviste kaldığı süre içinde belli zaman aralıklarıyla ve hasarlanma şüphesine düşüldüğünde kontrolleri yapılır [30]. Yorulma çatlakları kullanım esnasında malzemenin alt tabakasında oluşur, zamanla yüzeye açılırlar. Bu şekillenme ile yorulma çatlaklarının penetrant sıvı kontrol yöntemi ile teşhis olanağı sağlanır [27,29,30].

6.3. Penetrant Sıvı Yönteminin Uygulanışı

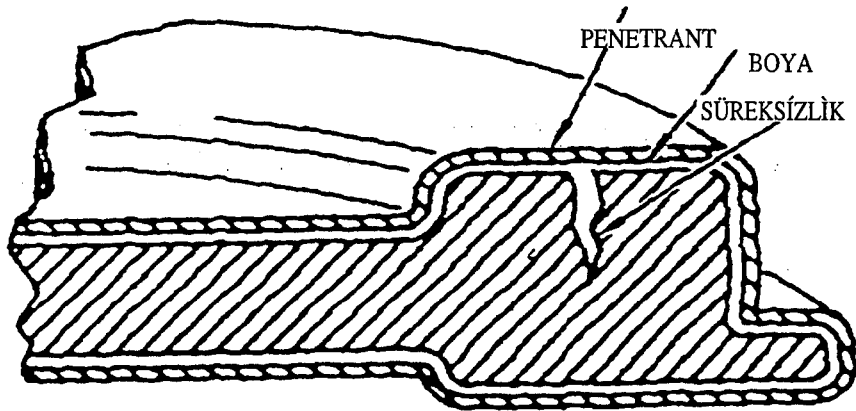
Kontrolü yapılacak malzeme yüzeyine penetrant sıvısı uygulanarak işleme başlanır. Sıvının süreksizliğe nüfus edebileceği belirli bekleme süresinden sonra penetrant fazlası yüzeyden temizlenerek geliştirici (developer) uygulanır. Pudra özelliği taşıyan developer kurutma kağıdı gibi görev yaparak süreksizliğe yerleşmiş penetrantı yüzeye taşır. Oluşan penetrant izleri süreksizlik belirtileridir.

Penetrant sıvı kontrol yönteminin gerçekleşmesi için altı işlem basamağının sırası ile uygulanması gerekir. Bu adımlar şunlardır: Yüzey hazırlama, penetrant tatbiki, fazla penetrantın giderilmesi, geliştirici (developer) uygulaması, kontrol, son temizlemedir [27,29,30].

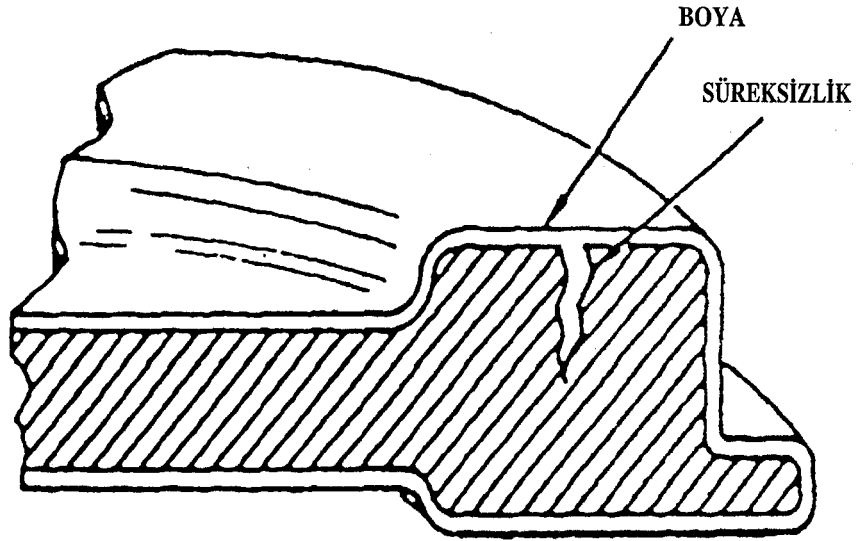
6.3.1. Yüzey hazırlama

Artıklar ve gres yağları penetrantın süreksizliklere girmesini engelleyen kirleticilerdir ve temizlenmesi zorunluluğu vardır. Kirletici listesi içine yağ, pas, kaynak sıçraması, asitler, kromatlar ve birçok kirleticiyi alabiliriz.

Su da kirletici olup, öncelikle test yüzeyinden giderilmesi gerekir. Boya ve metal kaplamalarının penetrant girişini engelleyeceğini düşünürsek, bu kaplamaların uygulanmasından önce yüzeylerin kontrolü yapılmalıdır. Kaplama yapılmış bir yüzey ile karşılaşıldığında penetrant sıvı kontrol yönteminin diğer işlem basamaklarına geçmeden önce kaplama yüzeyden sökülmelidir.



Şekil 6.1. Boyalı yüzeye penetrant uygulaması [27]



Şekil 6.2. Yıkama sonrası test parçası [27]

Boya ile kaplanmış malzeme yüzeyine tamamen yıkama işleminin yapılması istenilen yüzey hazırlama koşullarını yerine getirmez; çünkü süreksizliğe kapalıdır. Penetrant sıvı kontrol prensibinde penetrant süreksizliğe girmek zorundadır.

Boya türü yüzey kaplamaları sıcak tank içinde uygulanan alkali boya sökücüleri ile veya boya sökücü çözücülerle etkin bir şekilde temizlenebilir. Pas, pullanma, kaplama ve inorganik yüzey kirleri asitli karışımlar ile temizlenir. Sıcak alkali temizleyiciler pas ve pullanmayı temizlemede kullanılır. Yüzeye uygulanan bu temizleme işlemlerinde unutulmaması gereken nokta; yalın metal yüzeyine kadar inmek zorunluluğudur. Seramik türü malzemeler de, penetrant kontrolü uygulamadan önce toz ve kirden arındırılmalıdır [27,29,30].

Yöntemin birinci adımı olan yüzey hazırlama işleminde test malzemesinin bileşiminden, kirlerin tipi, pratiklik, zaman, ekonomiklik ve sağlığa zararlarına kadar bir kısım verileri değerlendirerek detaylandırılmış temizleme yöntemlerinden birini de seçmek gerekir. Sonuçta test yüzeyinin temiz, kuru, olması ve artıklardan arındırılması önemlidir.

1. Çözücü ile temizleme

Test parçalarının üzerinde bulunan gres ve çeşitli yağların giderilmesinde çözücü temizleyiciler kullanılır. Çözücü temizleyici seçiminde hemen buharlaşabilme özelliğinin aranması gerekir. Kolay buharlaşabilen solvent, penetrant girişini engellemeyecek ve işlemin sonunda yüzeyde sulandırıcı kalıntı kalmayacaktır. Tipik çözücülere; nafta (naphtha), boya incelticiler (mineral spirits), aseton (acetone), perkiloretillen (perchloroethylene), isopropil alkol (isopropyl alcohol) ve metilen klorid (methylene chloride) örnek gösterilebilir. Bunların tümü normal oda sıcaklığında hemen buharlaşırlar. Çözücü temizleyiciler pas, pullanma, kaynak akması ve sıçramaları gibi inorganik atıkların temizlenmesinde tercih edilmezler.

Çözücü temizleyiciler, gerekli emniyet önlemleri alınmadığı takdirde yaralanma ve hastalık nedeni olabilirler. Buharlarını solumaktan kaçınılmalı, çıplak elle temas edilmemelidir, açık alev ve sigara ile yaklaşılmamalıdır. Çalışma anında koruyucu teçhizat (maske, önlük, eldiven vs.) kullanarak çalışma ortamı havalandırılmalıdır [27].

2. Buharla yağ giderme

Gres ve yağ tipi organik kirlerin temizlenmesinde tercih edilen bir yöntemdir. Test parçalarını temizlediği gibi sahip olduğu ısı süreksizliklerdeki nemin buharlaşıp, dışarıya atılmasına yardımcı olur. Klorlanmış çözücü kullanımı nikel, paslanmaz çelik ve titanyum gibi bazı belirli metallere zarar verici olabilir. Bu tür test parçalarında temizlik amacı ile kullanılmamalıdır.

3. Deterjanla temizleme

Bu temizleme yöntemi; yanıcı özelliği olmayan su ile karışabilen deterjan türlerinin uygulanmasına dayanır. Sıcak tank kullanımı etkinliğini artırarak iyi bir yüzey temizliğinin gerçekleşmesini sağlar.

Deterjan seçiminde asetik veya doğal alkali olmasına bakılmaksızın deterjanın test malzemesi için korozyon yapıcı olmaması önemlidir. Temizlemeyi takiben durulama ve kurutma gereklidir. Kurulama işlemi sıcak hava üfleyicileri, ısı lambaları ve fırın kullanımı ile gerçekleştirilir.

4. Buharla temizleme

Taşıma zorluğu olan büyük parçaların temizlenmesinde uygulanır. Organik kirler kadar inorganik kirleri de temizler. Fakat derin süreksizliklerin tabanına ulaşamaz. En son işlem olarak çözücü ile temizleme yapılmalıdır.

5. Ultrasonik temizleme

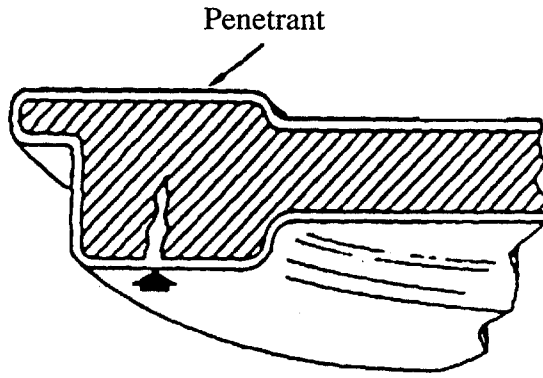
Ultrasonik temizlemede, sıvı temizleyici içinden geçen yüksek frekanslı ses dalgalarından yararlanır. Yüksek frekanslı ses dalgası üreten kaynak, dalgalı kavitasyonlara neden olur. Bu kavitasyonlar büyür ve malzeme ile kir arasında bir kazıma etkisi göstererek kiri parçadan ayırır. Bu teknik metallere, plastiklerden, seramiklerden ve camdan yabancı maddeleri ayırmak için kullanılır. Köşelerdeki, küçük deliklerdeki ve yarıklardaki yabancı maddeleri temizlemede en etkili yöntemdir.

6. Mekanik temizleme

Mekanik temizleme yönteminin uygulama yardımcıları olan tel fırça, kumlama, zımpara, ege ve raspa kullanımı genel olarak tercih edilmemelidir. Kullanım zorunluluğu doğduğunda, normalde yüzeye açık olan süreksizlikler kapanabilir. Kapanan bu süreksizlikleri yeniden ortaya çıkarmak için kimyasal dağlama (Chemical etching) yapılabilir. Mekanik temizleme riskli bir işlem olup. tecrübeli personele danışılmalıdır [27,29].

6.3.2. Penetrant boya tatbiki

Penetrant tatbiki ikinci işlem basamağıdır. Bu basamakta kullanılacak olan penetrantın amaca uygun özelliklere sahip olması gerekir. Temel olarak her sıvı bir penetrant olarak düşünülebilir. Tabiatıta doğal bir güç olan kapiler hareketten (capillary action) faydalanılarak nüfuziyet gücü (penetrating power) elde edilir. Bu güç her sıvıda vardır. Kapiler hareket, ağaçlarda özsuynun yapraklara ilerlemesi, gaz lambasının fitilinde gazın yukarı doğru yükselmesi, havlunun suyu emmesi, kurutma kağıdının mürekkebi emmesi olaylarında gözlemlenir. Penetrant her durumda bir sıvıdır. Yüzey üzerine dökülen penetrant süreksizlikler içine kendi başına sızmaz, aynı zamanda yer çekim kuvvetinden bağımsız çalışan kapiler hareket tarafından süreksizliklerin içine emilir (gravity) [27,28,30].



Şekil 6.3. Penetrant uygulaması [27]

Bir malzemenin taban yüzeyi penetrant ile kaplandığında, penetrant yerçekim kuvvetine bağlı kalmaksızın kapiler hareketten aldığı güç ile çatlğa nüfuz ederek, yukarı doğru ilerleyecektir (Şekil 6.3).

Bugün yağ ve beyazlatma yöntemindeki yağ ve gazyağı yerine penetrant kullanılsa bile, günümüzde modası geçmiş olarak kabul edilerek, üreticiler tarafından yeni ürünler elde etmek için çalışmalar sürdürülmektedir.

Penetrantı iyi yapan tek bir özellik mevcut değildir. İyi ürün sağlanması için uygun özelliklerin birleşimi gereklidir. Penetrant sıvı kontrolünde kullanılan penetrant doğru viskozite, ıslatma kabiliyeti ve yüzey gerilim özelliklerine sahip olmalıdır. Penetrant akıcılık, yüzeye yayılabilme ve ince süreksizliklere sızma kabiliyetine de sahip olmalıdır. Aynı zamanda yüzeyden de akmamalı, test yüzeylerine yapışarak yerlerini muhafaza etmelidir. Çok hızlı şekilde buharlaşarak kurumamalı, parlama noktaları bir patlama ya da yangın olasılığını en aza indirmek için yüksek olmalıdır. Düşük bir yoğunluğa sahip olma penetrant için iyi bir özelliktir. Su yaygın bir çözücüdür. Penetranta yerleşmeye ve onu ayrıştırmaya çalışır. Bu özellikleri içeren ürünün kimyasal karışımı öğrenilmelidir. Uygun bileşikler operatör için şans eseri bulunmaktadır.

Bugün kullanılan penetrantlarda beş özelliğin olması gerekir [27,30,]. Bunlar:

- 1- Karışım halindeki boyayı tutmak.
- 2- Boyayı düzgün bir şekilde yüzeye yaymak.
- 3- Yüzeye açık süreksizliklerin içine boyayı taşımak.
- 4- Yüzeye geri çekilirken boyayı beraberinde getirmek.
- 5- İstendiği zaman kolaylıkla giderebilmek.

İlk dört özellik boyalarla ilgili özelliklerdir. Yeni penetrantlara boyaların ilave edilmesi ile bugün kullanılan penetrant kontrol yöntemleri isim almaktadır.

6.3.3. Penetrant tipleri

6.3.3.1. Floresan penetrant (Tip 1)

Floresan boya karışımı ile elde edilen penetrant türüdür. Genellikle karartılmış veya yarı karartılmış ortamlarda 320 - 400 nanometreler arasında dalga boyuna sahip siyah ışık altında görülür. Süreksizlikler büyük olmaları dışında, beyaz ışık altında görülmezler. Sarı-yeşil parlaklığa sahiptirler. Özel uygulamalar için mavi ve kırmızı parlaklık veren floresan penetrantlar mevcuttur. Kullanımı özel teçhizat gerektirmesi onun seçimini zorlaştırırsa da en iyi hassasiyete sahip olan penetranttır [27,28,30].

6.3.3.2. Görünür penetrant (Tip 2)

Görülebilir boya içerikli penetrant türüdür. Renk kontrast penetrantı olarak da isimlendirilir. Gün ışığı veya aydınlatılmış bir ortamda görülebilen parlak kırmızı bir renge sahiptir. Karanlık oda ve siyah ışığa gereksinimi olmadığı için kullanımı basittir. Özel uygulamalar için özel renklere sahip olanları vardır. Hassasiyeti floresan penetranta göre azdır.

6.3.3.3. Çift duyarlı penetrant (Tip 3)

Çift duyarlı penetrantların üretilmesinde, floresan ve görünür boya karışımı kullanılır. Bu şu anlama gelir; Veriler siyah ışık altında görülebildiği gibi normal ışıkta da görülebilir. Ne floresan ne de görünür penetrantlar tek başlarına bu özelliğe sahip değildirler. Çift duyarlı penetrant, görülebilir ışıkla (ampul ışığında) büyük süreksizlikleri kontrol etmemize olanak sağlar. Siyah ışık ile de aynı olanağa ilaveten çok küçük çatlakların, gözeneklerindeki penetrant değiştirilmeden kontrolü gerçekleştirilir [27,28,30].

6.3.4. Penetrant sıvının uygulanma teknikleri

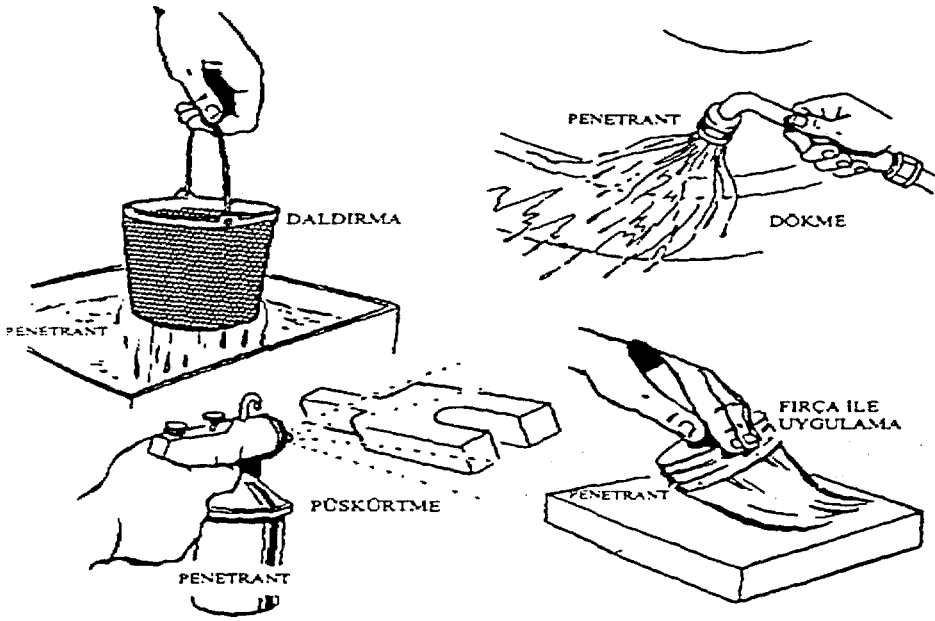
Penetrantın test malzemelerinin yüzeylerine uygulanması ile penetrant uygulama basamağı, başka bir ifadeyle penetrant kontrol yöntemi ikinci işlem basamağına geçilmiş olur. Penetrant, test parçası üzerine aşağıdaki tekniklerin biri ile uygulanır (Şekil 6.4).

Daldırma Yöntemi: Bu uygulama tekniğinde test parçası, penetrant dolu bir tankın içine daldırılır, daha sonra çıkarılır ve süzülme bırakılır.

Püskürtme Yöntemi: Püskürtme tabancaları ya da basınçlandırılmış püskürtme kapları ile teknik uygulanır.

Fırça ile Uygulama: Boya fırçaları veya lifsiz bezler ile uygulanır.

Dökme Yöntemi: Penetrantın, test edilecek parçanın üzerine dökülüp, süzülme bırakılması tekniğidir.



Şekil 6.4. Penetrant uygulama teknikleri [27]

Uygulama tekniklerinin penetrantın süreksizliklere giriciliğini kolaylaştırma eğilimleri yoktur. Hatırlanırsa penetrantın giriciliği kapiler hareketle birlikte çalışır. Örneğin; püskürtme tekniği penetrant girişine bir avantaj sağlamaz. Uygulama tekniklerine bakılmaksızın, test edilecek alanın penetrant ile tamamen kaplanması zorunluluğu vardır.

En az kaplama alanı için, test alanı 1 inch (2,5 cm) çevreleyecek şekilde kaplanması akılda tutulmalıdır. Örneğin; test alanı kaynaklı bölge olabilir. Bu kaynaklı bölgenin en az 1 inch'lik çevresi kaplanmalıdır [27,30].

6.3.5. Nüfuziyet zamanı

Penetrantın süreksizliklere girmesi için yeterli zaman ayarlanmalıdır. Bu zaman, nüfuziyet (penetration) veya bekletme zamanı (dwell time) olarak adlandırılır.

Doğru zamanı belirleme, şartnameleri ve imalatçıların önerileri ile penetrant içine işleme tablolarının kullanılmasıyla elde edilir. Asla unutulmaması gereken bu tablolardaki sürelerin minimum zamanlar olduğudur. Tablodaki zamanlar penetrantın, bir süreksizliğe işlemesi için önerilen en az zamanı belirtir. Penetrant test edilecek yüzeyler üzerinde belli bir süre kalmak zorundadır. Süreksizlik içine nüfuziyet zamanı veya bekletme zamanını belirleme esası çok basittir. Penetrantın ince, sıkı süreksizliklere girebilmesi için, geniş süreksizliklerden daha fazla zamana gereksinimi vardır [27,30].

6.3.6. Uygulama ısısı

Penetrant zaman tablosunun kullanımında göz önüne alınmasını istenilen son nokta verilen zamanların uygulanması için normal sıcaklık aralığının dikkate alınmasıdır. Penetrant sıvı kontrolünde penetrant ve test parça ısısı 60 ile 125°F (16 - 52 °C) limitleri içinde kalmalıdır [3]. Tabloların çoğu bu şekilde kullanılır.

Yüksek sıcaklık derecelerinde penetrant bir kısım özelliklerini yitirip, yoğunluğu ters yönde değişecektir. Buharlaşıma olacağından kontrolün işlevsel kabiliyeti etkilenecektir. Test parçaları tutulamayacak kadar sıcak olacağından parmakların yanma tehlikesi doğacaktır. Eğer kontrol üst ısılarda yapılacak ise özel yüksek ısı penetrantları kullanılmalıdır.

Kısmen de olsa problemler düşük ısı limitinde de görülür. Donmaya yakın veya donma derecesinin altındaki ısılarda penetrant uygulaması özel düşük ısı penetrantları ile gerçekleştirilir. 16 °C (60 °F) altında klasik penetrantların uygulama zorluğu vardır ve hassasiyeti azalır. Zaman tablosunun kullanılabilir olması için test parçalarının olduğu kadar penetrantın da yerleşme süresince 16 ile 52 °C (60 - 125 °F) sıcaklık aralığında kalması gereklidir [27,30].

6.4. Fazla Penetrantın Giderilmesi

Penetrant sıvı kontrol yönteminin üçüncü işlem basamağı olan fazla penetrantın giderilmesi başlığında yer alan fazla penetrant (Excess penetrant), gereksinim duyulan yerleşme zamanı sonunda test parçalan yüzeyinde, süreksizliklerin dışında kalan penetranttır. İşte, üçüncü basamakta bu fazlalık kaldırılacaktır.

Üçüncü basamağa başlamadan önce penetrantın ıslak olması zorunluluğu vardır. Eğer penetrant kurumuş ise tekrar ıslatılmaz. Bu durumda birinci basamak olan yüzey hazırlama basamağında işleme başlamak gerekmektedir. Daha sonraki basamaklardaki işlemlerde de bir gecikme olursa aynı uygulama tekrarlanmalıdır. Tersinin yapılması ise güvenilmeyen bir kontrol sonucunu ortaya koyacaktır.

İkinci basamakta üç ana tip boya penetrant olduğu vurgulanmıştır. Penetrantlar fazla penetrantı temizleme şekillerine göre de metotlara ayrılır [27,28,29]. Bunlar şu şekildedir:

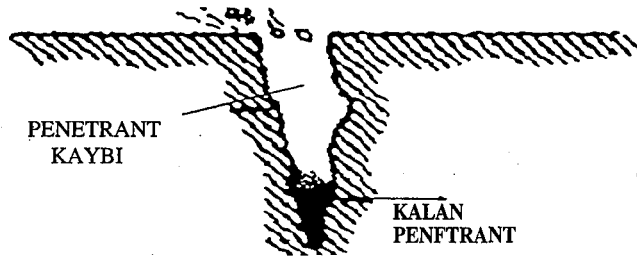
- Su ile yıkanabilen (metot A).
- Sonradan seyreltilme (metot B-D).
- Çözücü (solvent) ile temizlenen (metot C).

Su ile yıkama metodunda, kendinden seyrelen penetrant kullanılır. Fazla penetrant su ile yıkanır. Sonradan seyreltilme metodunda kullanılan penetrant, içinde seyreltici madde bulundurmaz. Seyreltici (Emülsifier) ve su kullanarak gerçekleşen iki aşamalı bir fazla penetrant temizleme işlemi kapsar. Fazla penetrant ayrı bir seyreltici uygulanarak su ile yıkanabilir konuma getirilir. Daha sonra su işleminin uygulanması ile yüzeyden temizlenir. Çözücü ile temizleme metodu, sonradan seyreltilen penetrant (post-emulsified) tipinde kullanılır. Seyreltici ve su kullanımı yerine penetrantın temizlenmesinde çözücü kullanılır. Su ile yıkanabilir penetrantları (water washable) su ile yıkanabilir konuma getiren, penetrantın içinde bulunan seyrelticiye sahip olmalarıdır. Seyreltilen ve çözücü ile temizlenen penetrantlar kendilerini su ile yıkanabilir konuma dönüştürecek bir seyrelticiye veya uygun bir çözücüye gereksinim duyarlar [27].

6.4.1. Su ile yıkanabilir penetrant

Suyla yıkanabilir penetrantlar anımsanacağı gibi içinde hazır seyreltici içerir. İçeriğinde bulunan bu seyreltici penetrantı su ile temas ettiğinde çözündürülerek yıkanabilir konuma getirir. Fakat aşırı yıkama (over wash) olarak adlandırılan gelişigüzel yıkama penetrantı, süreksizlikten ayırabilir. Su ile yıkama işlemi kritik olup, dikkatlice uygulanmalıdır (şekil 6.2).

Su ile yıkanabilir penetrantları yüzeyden ayırırken kaba basınçlı (20-30 PSI) su püskürtmenin en iyi sonucu verdiği saptanmıştır [27,30]. Fazla penetrantı yüzeyden ayırma işlemi yeterli bir zamanla sınırlandırılmıştır. Eğer görünen boya içerikli penetrant yüzeyden uzaklaştırılıyorsa, yüzey renkten arınıncaya kadar yıkanmalıdır. Penetrant floresan özelliğe sahipse yıkama işlemi siyah ışık altında yüzeyde renk parlaklığı kalmayıncaya kadar sürdürülmelidir. Sadece bir miktar, olası bir süreksizlikten gelen penetrant kalacaktır (şekil 6.5).



Şekil 6.5. Aşırı yıkama [27]

Penetrantı su ile yıkarken, akılda tutulması gereken bir öneri daha vardır. Suyun ısısı 60-110 °F (16-43 °C) arasında tutulmalıdır. Yüksek ısıdaki su daha fazla penetrantın süreksizlikten ayrılmasına ve kuvvetli görüntülere neden olan penetrantın zayıf belirtiler vermesine neden olmaktadır. Düşük ısı ise, suyun penetrant fazlasını temizlemedeki etkinliğini azaltır [27,30].

6.4.2. Sonradan seyreltilen penetrant

Bu usulde kullanılan penetrantlar, seyreltici içermediğinden seyreltme işlemi, ayrı bir seyreltici uygulanarak penetrantın parçalanması ve su ile yıkanabilir konuma getirilmesi ile yapıldığından sonradan seyreltme (post-emulsification) olarak adlandırılır. Seyreltici, penetrant ile görünüş olarak karışmaması için genellikle portakal renklidir [28,30].

6.4.3. Çözücü ile temizlenen penetrant

Çözücü ile ayrıştırma usulünde mümkün olduğunca fazla penetrant önce, temiz, kuru, lifsiz bir bez parçası ile veya emici kağıt ile test yüzeyinden temizlenir. Test parçası üzerine çözücü direkt olarak uygulanmamalıdır. Çözücü veya penetrant ayırıcı ile nemlendirilmiş kağıtla temizleme işlemi yapılmalıdır.

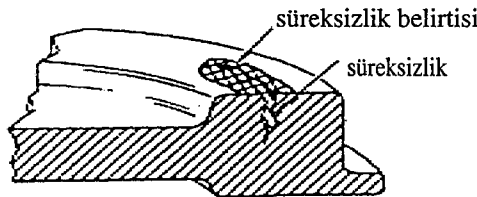
6.5. Geliştirici (developer) Uygulaması

Üçüncü basamağın sonunda bazı süreksizlikler büyüklüklerine ve yerleşimlerine bağlı olarak bazı şekiller oluştururlar. Bugün kullanılan bazı görünür penetrantlar özellikle geliştirici kullanmadan uygulanabilecek şekilde hazırlanmaktadır. Fakat genellikle geliştirici gereklidir.

Yağ ve beyazlatma yöntemi kullanıldığı günlerde, beyazlatıcı olarak tebeşir tozu (developer) kullanılmaktaydı. Kullanım amacı, süreksizliklerden yağı çekip belirtiler oluşturmaktır. Bugünkü geliştiriciler aynı amaç için test yüzeyine uygulanmaktadır.

Oldukça emici özellikte artırılmış pudra, bugünkü geliştiricilerin en önemli içeriğidir. Bu pudra test yüzeyine uygulandığında (fazla penetrantın temizlenmesinden sonra) kurutma kağıdı gibi görev yaparak penetrantı yüzeye doğru emer ve süreksizlik belirtilerini oluşturmak üzere penetrantı yayar. Emme işlevi kapiler hareket gibi, fakat bu kez ters yönde çalışır [27]. Gerçek anlamda penetrant süreksizliklerden pudra tarafından çekilir. Bir süreksizlik belirtisi görüldüğünde, aslında geliştirici içine yayılmış penetrant görülmektedir.

Geliştiriciler penetrantı yüzeye çekmek ve süreksizliklerin görünümünü kolaylaştırmaya eğilimlidirler. Süreksizlik görüntüsü gerçek boyutlarından daha büyük görünür. Şekil 6.6 tipik süreksizlik görüntüsüdür.



Şekil 6.6. Süreksizlik belirtisi [27]

6.5.1. Geliştirici tipleri

Penetrant sıvı kontrolünde kullanılan dört temel geliştirici vardır. Bunlar: Suda askıda kalan parçacıklı geliştirici, suda çözünebilir geliştirici, kuru geliştirici, susuz yaş geliştiricidir. İlk ikisinin su ile işlem gördüğüne, diğer ikisinin su ile ilgisi olmadığına dikkat edilmelidir [27,29].

1. Suda asılı kalan parçacıklı geliştirici

Geliştirici parçacıkları süspansiyon halinde su içinde tutulur ve devamlı bu şekilde kalabilmesi için sürekli çalkalanması gerekir. Geliştirici tipleri içinde, küçük süreksizlikleri test etmede en duyarsız olanıdır.

2. Suda çözünebilir parçacıklar

Geliştirici suyun içinde bir çözelti oluşturacak şekilde erimiştir. Bir kere karıştırıldığında devamlı karışmış olarak kalır. Küçük süreksizlikleri tespit etmede daha hassas ve etkilidir.

3. Kuru geliştiriciler

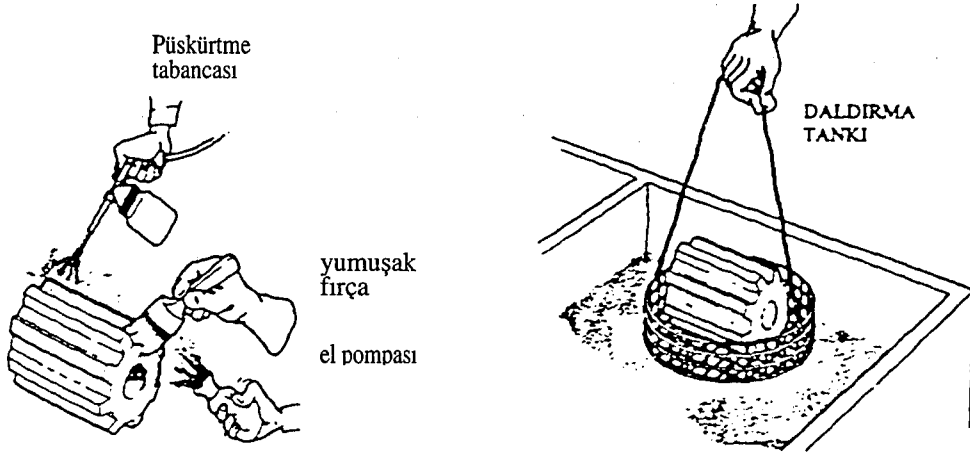
Kuru geliştiricilerde yaş geliştiriciler gibi penetrantı yüzeye çıkartmak amacı ile kullanılır. Hassasiyetleri suda çözünebilir geliştiricilerle aynıdır. Yaş ve kuru geliştirici arasındaki fark; kuru geliştirici sıvı içine konmaz ve toz halinde uygulanır. Yüzey, toz geliştirici uygulanmadan önce kurutulur.

Kuru toz geliştirici uygulanmasından önce test yüzeyinin kuru olması oldukça önemli bir gereksinimdir. Islak bir yüzey toz zerreciklerinin düzgün bir dağılımına izin vermeyecektir. Hatta bu bölgelerin üzerinde karmakarışık ve çok kalın yığıntılar oluşmasına neden olur. Böylece süreksizlik belirtileri de belirginleşemez. Bu durum, su esaslı yaş geliştiricinin uygulanmasından önce yapılan kurutma işleminin, kuru toz geliştirici uygulamasında test parçasının yüzeyinin kurutulmasından sonra yapıldığı kavramını gündeme getirir [27,29,30].

4. Susuz yaş geliştirici

Bu geliştiricinin özelliği, hızlı kuruyan bir çözücü ile süspansiyon oluşturacak şekilde karıştırılmış olmasıdır. Bu nedenle adı susuz yaş geliştiricidir.

Kuru geliştiricide olduğu gibi sadece kuru yüzeye uygulanabilir. Genellikle uygulama basit bir püskürtme tabancası veya sprey tüpü ile yapılır.



Şekil 6.7. Geliştirici uygulama yöntemleri [27]

Bu tip geliştirici küçük süreksizlikleri saptamakta en etkili ve hassas olan geliştiricidir. Susuz yaş geliştirici uygulamadan önce kuru geliştirici kullanımında olduğu gibi test yüzeyi kuru olmalıdır (şekil 6.7).

6.5.2. Geliştirici zamanı

Penetrant için bir yerleşme zamanı olduğu gibi geliştirici için de benzeri bir gelişme zamanı vardır. Geliştiricinin uygulanmasından test parçasının değerlendirilmesine kadar geçen zaman olarak tanımlanır. Bu süre, belirtilerin oluşmasına yetecek kadar bir süre olmalıdır. Fakat belirtilerin bozulmasına, bulanıklaşmasına neden olacak kadar uzun bir süre olmamalıdır. Genel olarak gelişme zamanı olarak, penetrant nüfuziyet zamanının yarısı kullanılabilir [27,29].

6.6. Kontrol İşlemi

Penetrant kontrol işlemindeki beşinci basamak, kontrol olarak adlandırılan, penetrant belirtilerinin ve sonuçlarının araştırılmasıdır.

Kontrol işlemi sonucunda, ya gerçek belirtiler ya da ilgisiz belirtiler ortaya çıkar. Gerçek belirtiler, test parçasının yüzeyindeki gerçek süreksizliklerden yukarı çekilen penetrantın ortaya koyduğu belirtilerdir. Penetrant sıvı kontrolünün başlangıcından itibaren ilgilenilen ve aranılan bu tip belirtilerdir. İlgisiz belirtiler "yanlış" belirtiler olarak da adlandırılır. Bu tip belirtiler, süreksizliklerin dışında kalan sebeplerden kaynaklanır. Asıl süreksizliklerden ortaya çıkmayan ve test parçasının kabul edilebilirliğinin ortaya koyduğu belirtilerdir. Fakat bir takım sorunların varlığını da ortaya koyar. Birinci basamak olan yüzey hazırlama basamağında yeterli yüzey temizliği yapılmaması veya üçüncü basamakta penetrant fazlasının iyi giderilememesi bu tip ilgisiz belirtilerin başlıca nedenleridir. Ortaya çıkan çizgisel veya yama şeklindeki belirtiler gerçek belirtileri gizleyebilir. Kontrolü baştan itibaren tekrarlayarak düzeltme işleminin yapılması gerekir [27,30].

Toz, kir, iplik, pamuk lifleri gibi maddelerde süreksizliği andırır belirtiler oluşturur. Penetrant, düzgün olmayan yüzeyle, keskin köşeler ve kör delikler tarafından da tutulabilir. İlgisiz belirtilerin diğer kaynakları ise kama yatakları, baskı veya birleşim noktalarıdır.

İlgisiz belirtilerin gerçek belirtilere benzemesi sorunlar yaratır. İplik ve tozdan kaynaklı belirtiler bunlara örnek olup, bazen doğru belirtileri gizler veya görülmesini engellerler.

6.7. Son Temizleme

Penetrant sıvı kontrolünün en son basamağıdır. Doğal olarak penetrant sıvı kontrol yönteminde, değerlendirme sonucunda test parçasının servis ömrünü doldurduğu saptanırsa altıncı basamak iptal edilir.

Test parçası süreksizlik içermiyorsa bu basamak genellikle gereklidir. İyi bir son temizleme yapılmazsa nemi çekmeye eğilimli olan penetrant ve geliştirici kalıntıları parçanın paslanmasına neden olabilirler veya parça üzerinde daha sonra yapılacak işlemlerde engel çıkarabilirler. Genellikle, son temizleme yöntemleri, ön temizleme için önerilen yöntemlerin benzeridir. Su tabanlı maddeleri temizlemede deterjan temizleyiciler en iyi sonucu verirken, yağ tabanlı maddeler için buharlaşabilir yağ çözücüler en iyi sonucu verirler. Geliştiricilerin temizlenmesinde çoğu zaman sadece su yalnız başına yeterlidir [27].

6.8. Penetrant Sıvı Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Penetrant sıvı kontrol yönteminin avantajları şunlardır: [27,28,29,30]

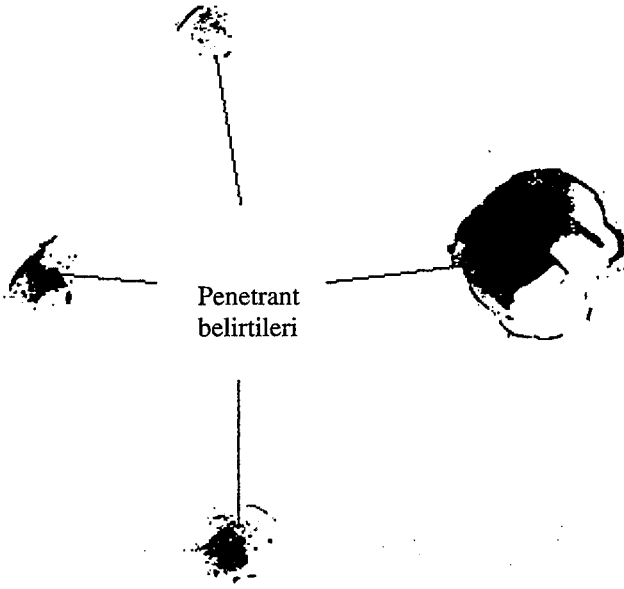
1. Yüzeğe açık süreksizliklerde kesin ve doğru sonuçlar vermesi.
2. Uygulanan işlem sonrası parça yada malzemeye zarar verilmez.

Penetrant sıvı kontrol yönteminin dezavantajları şu şekilde özetlenebilir:
[27,28,29,30]

1. Gözenekli yapılarda uygulama güçlükleri.
2. Tekniğin sadece yüzeğe açık uygulamalarda kullanılması; dolayısıyla yüzeğe altı süreksizliklerin tespit edilememesi.
3. Tekniğin uygulanmadan önce ön temizliğe ve uygulama sonrası tekrar yüzeğe temizliğine ihtiyaç duyulması.
4. Nüfuziyet süresi boyunca beklenme zorunluluğu.

6.9. Uçaklarda Penetrant Sıvı Kontrol Tekniğinin Sandviç Kompozitlere Uygulanması

Penetrant sıvı kontrol yöntemi tahribatsız muayene tekniklerinin en basit, fakat uygulamalarda vazgeçilemeyen bir tekniğidir. Uçak yapısında tüm yüzeğe kaplamalarına, iniş takımı dikmelerine, kanat-gövde bağlantı elemanlarına, kanat yapısal elemanlarına, gövde yapısal elemanlarına, tüm kumanda yüzeğlerine ve motor parçalarına uygulanabilmektedir. Sandviç kompozitlerin kontrolünde yüzeğlere uygulanabilmekte, yapı içindeki süreksizliklerin tespitinde kullanılmamaktadır. Ancak portatif cihazlarının bulunuşu ve ucuz olması nedeniyle vazgeçilemez bir tekniktir. Şekil 6.8 ve 6.9'da sandviç kompozitlere penetrant sıvı uygulama yöntemleri verilmiştir.



Şekil 6.8. Boeing 737-800 tipi uçağının kanat kaplaması üzerinde oluşan hasarın sıvı penetrant yöntemiyle tespiti [17]



Şekil 6.9. Boeing 737-800 tipi uçağının kanatçığı üzerinde oluşan hasarın sıvı penetrant yöntemiyle tespiti [17]

7. SONUÇ

Tahribatsız muayene yöntemleri, incelenilen malzemeye zarar vermeden, yapı hakkında bilgi edinmek için uygulanan kontrol teknikleridir. İncelenilen hasar tipine göre uygun teknik seçilmekte ve yetkili kişiler tarafından muayene yöntemleri uygulanabilmektedir.

Havacılıkta bakım maliyetlerinin azaltılması ve uçuş emniyetinin sağlanması tahribatsız muayene tekniklerinin uygulanması ile mümkün olmaktadır. Günümüzde hasarları en kısa sürede ve doğru olarak belirleyecek yeni tekniklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum tahribatsız muayene yöntemleri ile ilgili teknolojik gelişmelerin izlenmesini ve uygulanmasını gerektirmektedir.

Uçaklarda hafiflik ve mukavemet özelliklerinin uygun olması nedeni ile tercih edilen ve her geçen gün kullanım alanları artan sandviç kompozitlerin bakım ve kontrollerinde de tahribatsız muayene yöntemlerinin önemi oldukça büyüktür. Tüm tekniklerde olduğu gibi sandviç kompozitlere uygulanan tahribatsız muayene yöntemlerinin de yetkili ve tecrübeli bakım personeli tarafından yapılması gerekmektedir.

Çizelge 7.1’de sandviç kompozitlere yaygın olarak uygulanan tahribatsız muayene yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları gösterilmiştir.

Çizelge 7.1. Sandviç kompozitlere yaygın olarak uygulanan tahribatsız muayene yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları

Teknik	Avantajlar	Dezavantajlar
Radyografi	<p>Yüzey ve iç yapı süreksizliklerinin tespiti.</p> <p>Gizlenmiş bölgelerin incelenbilmesi.</p> <p>Kalıcı sonuçlarının bulunması.</p> <p>Yüzey hazırlama işleminin basit olması.</p>	<p>Çok pahalı bir teknik olası.</p> <p>Test ve sonuçların değerlendirilmesi için bilgi birikimi ve tecrübe gerektirmesi.</p> <p>Süreksizliğin derinliğinin saptanamaması.</p>
Akustik emisyon ve ultrasonik kontrol	<p>Portatif cihazların bulunması.</p> <p>Çok küçük süreksizliklere duyarlılık.</p> <p>Sonuçların hemen gözlenebilmesi.</p> <p>Yüzey hazırlama işleminin basit olması.</p> <p>Geniş ve kalın yüzeylerin tespit edilebilmesi.</p>	<p>Yüzeyler test proplarının temas edebileceği konumda olmalı.</p> <p>Yüzeye kuplaj sürülme mecburiyeti.</p> <p>Ayarların yapılması ve sonuçların yorumlanması için tecrübe ve beceri gerekliliği.</p>
Termografi	<p>Hızlı gözlem (test) oranı.</p> <p>Temas olmaması.</p> <p>Güvenlik (yüksek güçle harici uyarıcılar kullanılmasına rağmen zararlı radyasyon içermez).</p> <p>Sonuçlar kolayca yorumlanabilir.</p> <p>Geniş uygulama alanı</p>	<p>Geniş bir yüzeye, kısa sürede, büyük miktardaki enerjiyi eşit olarak yayma zorluğu.</p> <p>Termal görüntünün bozulmasına termal kayıpların etkisi.</p> <p>Ekipmanların maliyeti.</p> <p>Sadece termal özelliklerin değiştiği parçaların incelenebilme durumu.</p> <p>Yüzey altındaki sınırlı kalınlıkların incelenebilmesi.</p>
Penetrant SIVI	<p>Portatif cihaz ve ekipmanlarının bulunması.</p> <p>Ucuz bir teknik oluşu.</p> <p>Küçük kılcal süreksizliklerin tespit edilebilmesi.</p> <p>Sonuçların 30 dakika içinde elde edilebilmesi.</p>	<p>Sadece yüzeye açık süreksizliklerin tespit edilebilmesi.</p> <p>Gözenekli yapıların test zorluğu.</p> <p>Yüzey hazırlama gerekliliği.</p> <p>İşlem bitiminde temizlik gerektirmesi.</p> <p>Sonuçların görsel olarak incelenmesi, kalıcı sonuçların bulunmaması.</p>

Yukarıdaki çizelgeden de anlaşılacağı üzere her bir tekniğin kendine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Uçaklarda sandviç kompozitlerin kontrolünde en etkin tahribatsız muayene yöntemleri radyografi ve termografidir.

Radyografide geniş ve derin alanlar kısa sürede doğru bir şekilde taranabilmektedir. Termografi ise yeni bir teknik olmasına rağmen süreksizliklerin tespitinde oldukça hızlı ve etkin bir tekniktir. Özellikle sandviç kompozitlerde belirlenmesi güç süreksizliklerin tespitinde ve yorumlanmasında termografi tercih edilen bir yöntemdir. Sandviç kompozitlerin kontrolünde basitlik sağlayan diğer bir teknik de akustik emisyon tekniğidir. Bu teknikte diğer tahribatsız muayene yöntemlerine göre oldukça net ve doğru sonuçlar sağlamaktadır. Değinilen bu tekniklerin yanı sıra basit ve ilkel bir tahribatsız muayene tekniği olan penetrant sıvı kontrolü de sandviç yapıların yüzeylerini incelemede basit ve etkili bir yöntemdir.

Aşağıdaki çizelge 7.2'de sandviç kompozitlerde oluşan bazı süreksizlik tipleri ve bunları belirlemede kullanılan en etkin tahribatsız muayene yöntemleri belirtilmiştir.

Çizelge 7.2. Sandviç kompozitlerde oluşan süreksizlikler ve tespit edilebildikleri tahribatsız muayene yöntemleri

Uygulanan Tahribatsız Muayene Yöntemi	Sandviç kompozitlerde oluşan süreksizlikler						
	Su	Nem	Yüzey Çatlağı	Yapıştırıcı bozulması	Korozyon	Çekirdek yüzey ayrılması	Yapı içinde oluşan hasar ve süreksizlik
Radyografi	X	X	X		X	X	X
Akustik emisyon	X		X	X		X	X
Termografi	X	X	X	X	X		X
Penetrant sıvı			X				

Uçak bakım ve kontrollerinde dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan bir tanesi uygun kontrol tekniğinin belirlenmesidir. Uygun kontrol tekniğinin belirlenmesi doğru ve net sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır. Burada uygulayıcı personelin bilgi birikimi, tecrübesi ve dikkati ön plana çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

1. TANATMIŞ, A. A., *Uçak Yapılarında Gelişmiş Malzemelerin Kullanımı*, Bilim Günleri, TMMOB Mak. Müh. Odası, Denizli, 287-294 (1999)
2. WICK, C ve VEILLEUX, R.F., *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, Vol3, Chapter 8, 13-30 (1986)
3. TOLUN, S., *Uçak Yapıları*, A.Ü. Sivil Havacılık Y.O., Eskişehir, 493 p. (1991)
4. FAA, *Airframe and Powerplant Mechanics – Airframe Handbook*, 600p. (1996)
5. STINTON, D., *The Design of The Aeroplane*, Granada Pub., UK, 463p. (1983)
6. CRANE, D., *Airframe Aviation Maintenance Technician Series*, Canada, 234-255. (1996)
7. ÖZDEMİR, E.ve ŞAHİN, Ç., Türk Havayolları Kompozit Atölyesi Eğitim Notları.
8. JAPPESEN, *A&P technician airframe textbook*, Jeppesen Sunderson Training Products, USA, 794 p. (1997)
9. MIDDLETON, D.H., *Composite Materials in Aircraft Structures*, Longman USA, 394p. (1990)
10. THE ROYAL AERONAUTICAL SOCIETY, *Materials in Aerospace*, London, 282 p. (1986)
11. DUPONT PRODUCTS DATABASE SEARCH RESULTS, *Korex Aramid Honeycomp*, <http://www.dupont.com> (2001)
12. M.C. GILL CORPORATION DOORWAYS, *A Few of the More Common Configurations*, <http://www.Mcgillcorp.com> (1999)
13. *Sandwivh Composites*, <http://www.ndi.net>, 11p. (2003)

14. SUMMERSCALES, J., *Nondestructive Testing of Fibre Reinforced Plastics Composites*, Vol 1, UK, 1-105 (1987)
15. JOSEPH BAR-COHEN, *In Service NDE of Aerospace Structures-Emerging Technologies and Chalanges at Tthe End of The 2nd Millenium*, <http://www.ndt.net>, 27p. (2002)
16. TRETOUT H, *Review of Advanced Ultrasonic Techniques for Aerospace Structures*, <http://www.ndt.net>, 10p. (2002)
17. BOEING DIGITAL TECHNICAL DOCUMENTS, *Nondestructive Testing Manual*, USA (2003)
18. BİRİNCİ HAVA İKMAL BAKIM MERKEZİ KOMUTANLIĞI ÜRETİM GRUP KOMUTANLIĞI, *Ultrasonik Kontrol El Kitabı*, Eskişehir, pp 1-32 (2000)
19. MALDAGUE, X., *Applications of Infrared Thermography in Nondestructive Evaluation*, Electricak and Computing Enginering Dept., Université Laval, Quebec City, G1K 7P4, Canada, <http://www.gel.ulaval.ca/~maldagx/>, 23p. (2001)
20. ZWESCHPER, TH., SALERNO, A., ve BUSSE, G., *Lock-in Thermography for Nondestructive Evaluation of Aerospace Structures*, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde Universitat Stuttgart Pfaffenwaldring, Germany, <http://www.ndt.net>, 9p. (2000)
21. Zweschper, Th., Dillenz, A., Riegert, G., ve Busse, G., *Lockin Thermography Methods for The NDT of Aircraft Components*, University of Stuttgart-Institute of Polymer Testing and Polymer Science Department of Nondestructive Testing Pfaffenwaldring 32, Germany, <http://www.ndt.net/article/ecndt02/249/>, 15p. (2003)
22. Wong, B. S., Tui, C. G., Bai, W., Tan, P., Low, B., ve Tan, K., *Termographic Evaluation of Defects in Composite Materials*, Nanyang Tecnolojical University, 18p. (1999)

23. DUNN, R. L., *Plant Engineering Magazine, Predictive Maintenance Technologies*, 1p. (2002)
24. TRETOUT H, *Termography for Aerospace Structures*, <http://www.ndt.net>, 10p. (2002)
25. BRÉMOND, P. ve POTET, P., *Lock-in Thermography : A Tool To Analyse and Locate Thermo-mechanical Mechanisms in Materials and Structures*, 7p. (2001)
26. Brémond, P., *Lock-in Thermography: a Tool To Measure Stres and To Detect Defects in Aircraft Industry*, 6p. (2001)
27. BİRİNCİ HAVA İKMAL BAKIM MERKEZİ KOMUTANLIĞI ÜRETİM GRUP KOMUTANLIĞI, *Sıvı Penetrant Kontrol El Kitabı*, Eskişehir, pp1-95
28. GENERAL DYNAMICS, *CT-6-2 Nondestructive Testing, Liquid Penetrant* (1996)
29. TO 33B-1-1, *Nondestructive Inspection Methods*, (1998)
30. ASNT, *Nondestructive Testing Handbook*, (1996)