

KOMPOZİT UÇAK YAPILARINDA GÖMÜLÜ TAHRİBATSIZ MUAYENE SENSÖRLERİYLE EŞ ZAMANLI HASAR İZLEME YÖNTEMLERİ

Sinan FİDAN*

Kocaeli Üniversitesi, Sivil Havacılık
Yüksekokulu, Arslanbey Kampüsü, İzmit
sinan_fidan@hotmail.com

Egemen AVCU

Kocaeli Üniversitesi, Makine Mühendisliği
Bölümü, Umuttepe Kampüsü, İzmit
avcuegemen@hotmail.com

ÖZET

Farklı yüklerle maruz kalan uçak parçalarında kompozit malzeme kullanımının yaygınlaşabilmesi için bu malzemelerin güvenilirliğinin artırılması ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi gerekmektedir. Uçak parçalarında planlanmış bakım onarım süreçlerinden önce büyük yapısal hasarlara yol açabilecek kritik malzeme çatlakları ortaya çıkabilir. Bu durum uçak malzemelerinin içyapılarının sürekli kontrol edilmesini gerektirmektedir. Kompozit malzemelerin muayene yöntemlerinin maliyeti, kompozit malzemeyi üretme ve serviste tutma maliyetinin yaklaşık üçte birini oluşturmaktadır. Bu çalışmada uçaklarda kullanılan kompozit malzemelerin eş zamanlı içyapı kontrollerinde kullanılan hasarsız malzeme muayene yöntemlerine kısaca değinildikten sonra kompozitlere gömülü hâlde kullanılan akıllı hasar tespit sistemleri (piezoelektrik uyarıcı ve sensörler) ve bu sistemlerin uçak kompozitlerinde uygulamaları irdelenecektir.

Anahtar Kelimeler: Uçak kompozitleri, eş zamanlı içyapı takibi, hasar tespit sensörleri

Simultaneous Damage Monitoring With Embedded Non-Destructive Sensors in Aircraft Composite Structures

ABSTRACT

For achieving widespread use of aircraft composite materials under various mechanical loadings during their service life, they have to be behave in a safe and economical manner. Critical material crack tips may be occurred in composite structures before their scheduled maintenance programs which could lead to serious structural failures. Cost of composite inspection techniques is 1/3 of total manufacture and service expenses of the composite. In this study after mentioning up-to-date non destructive inspection methods used in aircraft composite materials, simultaneous embedded smart damage monitoring systems (piezoelectric actuators and sensors) and their application to aircraft composites will be discussed.

Keywords : Aircraft composites, simultaneous interior damage monitoring, damage designation sensors

* İletişim yazarı

Geliş tarihi : 14.03.2011
Kabul tarihi : 28.03.2011

GİRİŞ

Kompozit malzemeler, metalik malzemelere karşı sağladıkları üstün özellikleri sayesinde uçak ana yapılarında (B787, Airbus A380, F35, Typhoon) giderek artan oranlarda kullanılmaktadırlar. Diğer taraftan fiber takviyeli kompozitlerin yapısı daha karmaşıktır. Heterojen ve farklı fazlarda malzemeleri (fiberler ve matris) bünyelerinde barındırmaları, farklı yayılma hızlarına sahip çok çeşitli hasar mekanizmalarının ortaya çıkmasına sebep olur. Çatlak tespiti ve ana yapının kalan ömür hesabının yapılması zor bir görev olarak ortaya çıkar. En sık karşılaşılan hasar türü darbeye bağlı ortaya çıkan hasarlardır. Kompozit yapıların, kalınlık doğrultusunda sahip oldukları düşük dayanımlarına bağlı olarak, düşük hızlı darbe yüklemeleri sonrası mekanik mukavemetlerindeki önemli düşüş, gözle görülür hasar bölgelerinin oluşmasına sebep olur [1]. Düşük hızlı darbe yüklemeleri; matris çatlaması, delaminasyon (bitişik tabakalar arasında ayrılma) ve fiber kırılmalarına bağlı olarak malzeme dayanımında ve yorulma ömründe önemli düşmelere sebep olabilir [2].

Kompozit yapılarda ortaya çıkan hasarların, yapının dayanım ve yorulma ömürlerine etkilerini ortaya koymak ve kritik hasar boyutunu belirlemek için birçok bilimsel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar her zaman tahribatsız muayene/değerlendirme/test [NDI, NDE, NDT] yöntemlerindeki gelişmelerle paralel şekilde yürütülmüşlerdir [3]. Kompozit malzemelerdeki hasarın tespiti, hasar bölgesinin belirlenmesi ve hasarın karakterize edilmesi için güvenilir bir tahribatsız muayene yöntemini bulmak çok çaba gerektirir. Modern tahribatsız test teknikleri literatürde; görsel inceleme yöntemleri, optik metotlar, eddy-current akımlarıyla inceleme (elektro-manyetik testler), ultrasonik incelemeler, lazer ultrason incelemeleri, akustik emisyon testleri, titreşim analizi, radyografi, termografi ve ışık dalgaları olarak listelenmiştir [4]. Bu çalışmada tahribatsız malzeme muayene yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarından bahsedilerek, bu yöntemlerin kompozit malzemelerde ortaya çıkan hasarları algılama yetenekleri ortaya konacaktır. Daha sonra akıllı hasar tespit sistemleri açıklanacaktır. Piezoelektrik transduserler tarafından üretilen düşük frekanslı Lamb dalgalarıyla eşzamanlı hasar tespit metodu hakkında bilgi verilerek, yöntemin avantaj ve dezavantajları ortaya konacaktır. Son bölümde piezoelektrik uyarıcı ve algılayıcı ağlarıyla hazırlanan akıllı hasar tespit sistemlerinin havacılık malzemelerinde uygulamaları verilecektir.

MODERN TAHRİBATSIZ MUAYENE (NDI) YÖNTEMLERİ

Görsel muayene çıplak gözle gerçekleştirilen bir inceleme yöntemidir. Test numunesinin yüzeyi temiz olmalı ve

inceleme için yeterli miktarda aydınlatma sağlanmış olmalıdır. Darbeye duyarlı kaplamaların, penetran sıvıların ve manyetik parçacıkların kullanılması incelemenin hassasiyetini ve çözünürlüğünü artırır. Yüksek çözünürlükte hasar görüntüsü ayrıca D-gözlemi yöntemiyle elde edilebilir [5]. Bu tür inceleme yönteminde çatlakların ortaya çıkarılabilmesi için yüzeyde olmaları gerektiğinden kullanımı sınırlı kalmaktadır.

Optik metotlarla inceleme yöntemleri; ışık geçirgenlik farklarına dayanan ve faz değişimleriyle ortaya çıkan girişim farkı görüntülerine dayanan fotoelastisite, holografi ve Moire metotlarını kapsar. Yapıların durum tespitinde, gerilme ile sıcaklık ölçümlerini de okumaya olanak tanıyan optik fiber sensörler ve daha da özeldi Fiber Bragg Grating (FBG) sensörleri yaygın olarak kullanılmaktadırlar [4]. FBG sensörlerin yüksek maliyetlerinin yanında, optik fiberin ve bağlantıların yapı içerisine yerleştirilmesi gibi uygulama zorluklarının da çözülmesi gerekir.

Shearography, malzeme yüzeyindeki yer değiştirme gradyanlarını ölçmek için nokta ayrışması interferometresini kullanan bir optik ölçüm yöntemidir [6]. Bu yöntemde nesne kolay anlaşılır bir noktasal ışık kaynağı yardımıyla aydınlatılır ve bir görüntü ayrıştırıcı kamera kullanılır. Malzemenin gerilmeli ve gerilmemiş resimlerinin farkı alınarak (benek deseni olarak bilinen) bir görüntü elde edilir ve gerilim farkları ortaya çıkar. Çatlaklar, hasar etrafındaki bölgede oluşan gerilme yığılmalarından tanımlanır. En yaygın rastlanan yüklenme dizilimi vakum gerilmesidir. Bu kompozitlerdeki ayrışmaların tespiti için uygundur. Yer değiştirme deseninin türevlerinde gözlemlenen değişimler hasarlı bölgenin derinliği veya çapı arttıkça düşecektir.

Eddy akımlarıyla inceleme; yüzeydeki ve yüzeye yakın bölgelerdeki çatlakları, korozyonu, delaminasyonu ve diğer yapısal kusurları tespit etmek için kullanılan elektromanyetik metotların en yaygın olanlarından bir tanesidir [7]. Elektriksel olarak iletken olan malzemelerde, ölçülmüş empedans ile derecelendirilmiş kusur boyutları arasında bir bağıntı kurarak çatlakları belirlemek için kullanılır.

Ultrasonik incelemede; çatlak varlığını ve çatlak boyutlarını kanıtlamak, geometrik boyutları ölçülendirmek ve malzeme özelliklerini karakterize etmek için, yoğun yüksek enerjili akustik dalgalar üreten bir sinyal üretici-algılayıcı çifti ve 1-50 MHz arasında frekans üreten dönüştürücü kullanılır [8]. İyi bilinen C-taraması yöntemi, hasar bölgesinin yeri ve boyutu hakkında çok hassas ölçümler yapabilir. Numunenin ön yüzeyinin, çatlağın ve numunenin arka yüzeyinin yansımaları arasındaki sinyal ilerleme zamanı ölçülerek (B-taraması); hasarın kalınlık ekseninde bulunduğu yer tespit edilebilir. Suya daldırma yöntemi iyi kurgulanmış bir yöntem olmasına rağmen test parçasının ana yapıdan sökülmesi gerekliliği, ana

yapının bağlı bulunduğu sistemin çalışmasının kesintiye uğramasına sebep olur. Bağlantıların sadece bölgesel olarak gerekli olduğu veya havalı bağlantıların kullanıldığı teknikler diğer alternatiflerdir; fakat hassasiyetleri daha azdır. Bununla birlikte, numuneyi iki boyutta tarama ihtiyacı hâlâ zaman alıcı bir süreç olarak ortada durmaya devam etmektedir.

Ultrasonik testte bulunan numuneyi su içine daldırma gereksinimi, lazer kaynaklı ultrason kullanılarak ortadan kaldırılmıştır [9]. Lazer teknikleri yüksek hassasiyetleri ve probun yüzeye dik açıda durma zorunluluğunun bulunmaması ile karmaşık geometri yapılarının incelemesinde esneklik sağlar. Diğer taraftan, lazer kaynaklı üretilen sinyaller geleneksel piezoelektrik dönüştürücülerle üretilen sinyallerden genellikle daha düşük genliğe sahiptirler. İki boyutlu taramaya olan ihtiyacı ve yüksek maliyeti bu yöntemin yaygın kullanımını sınırlandırmaktadır.

Akustik yayılım [10] katıların içindeki kusurların büyümesiyle ortaya çıkan gerilme dalgalarıyla üretilir. Birçok yöntem geometrik süreksizlikleri algılamak için akustik yayılım tabakalı kompozitlerde fiber kırılmaları, fiber ayrılmaları, matris çatlakları ve delaminasyonlar gibi malzeme içi hareketleri tespit eder. Tekniğin potansiyel kullanım alanlarını ortaya çıkarmak için, kompozit malzemelerin darbe hasarını araştırmayla [11] ve kırılma davranışlarını incelemekle [12] bağlantılı bazı çalışmalar yapılmıştır. İnceleme esnasında yapının gerilme yüklemesine maruz kalması zorunluluğu ve gürültülü çevre şartları, inceleme esnasında problem olabilmektedir.

Metal parayla vurma testi en çok bilinen titreşim tabanlı metottur. Kusurlu ve kusursuz bölgelerden çıkan sesler arasındaki fark, kusurun varlığının kanıtı olur. Metodun hassasiyeti, kusurun derinliği arttıkça azalır [13]. Diğer bir titreşim tabanlı metot, ultrasonik süreksizliklerden veya radyografik geçirgenlik tekniklerinden daha verimli olan doğal frekansların ölçümünü içerir. Bu inceleme yöntemi, tel sarma yöntemiyle üretilmiş karbon fiber takviyeli plastik boruların [14] kalite kontrolünde, yanlış tel sarma açıları veya yanlış tabaka düzenlemeleri gibi üretim hatalarını bulmada gelecek vadede bir yaklaşımdır.

İzotropik malzemeler için endüstride [15] radyografik inceleme yöntemi çokça tercih edilen özel bir yöntemdir. Karbon/fiber epoksi kompozitlerde geleneksel X-radyografi tekniğinin kullanımı sınırlıdır çünkü bu kompozitlerin X ışını emme kabiliyeti düşüktür. Bu malzemelerin incelemesinde metodun hassasiyetini artırmak için penetran sıvıların (örneğin çinko iyodür solüsyonu) kullanımını içeren alternatif teknikler geliştirilmiştir. Diğer taraftan sıvının nüfuz etmesini ve kusuru ıslatmasını sağlamak için yüzeyde yarıkların oluşturulması gerekir. Ayrıca penetran sıvıyı seçerken, matris özelliklerini etkilemeyecek sıvıların seçimine dikkat etmek gerekir. Şekil 1'de basma-basma

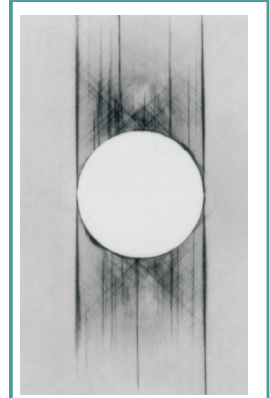
yorulması yüklemesine maruz kalmış karbon/fiber epoksi tabakası delik kenarı civarında [16] ortaya çıkmış aksel ayrılma, reçine (matris) çatlama ve delaminasyon hasarları gösterilmiştir. Delaminasyonlarla çevrelenmiş aksel ve aksel-dışı matris çatlakları belirgindir. Bu tip hasarlar içyapı hasarlarıdır, görsel veya birçok optik inceleme yöntemiyle bu hasarlar fark edilemez.

Geçici termografi; giriş enerjisi sadece bu yüzey üzerinden yayıldığı için, test numunesinin sadece bir yüzeyinin termal görüntülerini yakalayabilir. Sadece mükemmel homojen bir malzemeden ısı düzgün geçebilir. Kusurlar, ısının geçişine karşı yüksek termal dirençler oluşturur. Metodun hassasiyeti, kusurun yüzeyden olan derinliği arttıkça azalır. En iyi sonuçlar, mümkün olan en büyük enerji yüzeyde depolandığı zaman elde edilir. Termal hasarın oluşmamasına dikkat edilmelidir. Bu yöntem ayrıca bal peteği yapılarında kullanım için de uygundur. Isının uygulanması ve verilerin işlenmesi yoluna dayanan çeşitli termal teknikler mevcuttur. Kilitlemeli termografi ve darbeli termografi gibi çeşitli termal dalga yayılım metotları; delaminasyonları, korozyonu, yüzey çatlaklarını ve boşlukları tespit etmek için kullanılmıştır. Termal dalga yayılımının elastik dalga yayılımıyla birleştirilmesiyle ortaya çıkan titreşim termografisi gibi kombine yaklaşımlar; mikro çatlakları tespit etmek için verimli bir şekilde kullanılmıştır [17].

Özetlemek gerekirse, bahsedilen tekniklerin birçoğu, bileşenlerin bağımsız olarak test edilebilmesi için sökülmesini gerektirir, çok yer kaplayan algılayıcıları bünyelerinde barındırırlar, noktasal taramaya ihtiyaç duyarlar ve genelde zaman alan ve pahalı tekniklerdir. Bu noktada havacılık malzemelerinin muayenesi için yeni teknikler araştırılmış ve farklı uygulama alanlarına sahip olan akıllı malzemelerin havacılık uygulamalarında kullanılmaları düşünülmüştür.

UÇAK KOMPOZİTLERİNDE AKILLI HASAR TESPİTİ SİSTEMLERİ

Daha önce de belirtildiği gibi tekrarlı yüklerin ve korozyif atmosfer şartlarının etkisiyle havacılık malzemelerinde çatlak oluşumu kaçınılmazdır. Uçak parçalarında oluşan bu çatlakların, uçuş güvenliği için sürekli olarak izlenmesi gerekmektedir. Bir önceki bölümde havacılık malzemelerinde hasar tespiti ve takibi için kullanılan hasarsız muayene yöntemleri özetlenmiştir. Bu yöntemlerin büyük bir zahmet ve



Şekil 1. Basma-basma Yorulması Yüklemesine Maruz Kalmış Çok Yönlü Karbon Fiber/Epoksi Tabakalı Kompozitin Hasarını Gösteren Bir X-Işını Radyografisi Görüntüsü [16]

maliyet getirdiği açıktır. Son yıllarda havacılık sektörü, artan rekabet şartlarına paralel olarak uçuş güvenliğinin artırılması ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla alternatif hasarsız muayene yöntemleri arayışındadır. Bu noktada farklı uygulama alanları olan akıllı yapıların havacılık malzemelerinin muayenesi için kullanılması düşünülmüştür.

Akıllı yapılar (smart structures), geometrik ve yapısal özelliklerini beklenen görevlerin niteliğine uygun biçimde değiştirebilen yapılar olarak tanımlanmaktadır. Görevin amacı açısından faydalı olan bu değişimler dıştan uygulanan kumandalarla olabileceği gibi, dış uyarılara karşı yapının otomatik olarak gösterdiği tepkiler biçiminde de olabilir. Akıllı yapılar, pasif yapı yüzeyine yaygın olarak yapılandırılan ya da yapı içerisine gömülen akıllı malzemeler (uyarıcı ve algılayıcı malzemeler) ve işlemci ağlarından oluşmaktadır [18]. Uyarıcılar ve algılayıcılar farklı elemanlar olabileceği gibi aynı eleman da olabilirler. İki farklı amaç için kullanılacak bu tür elemanların tersinir özelliklere sahip olmaları gerekmektedir. Sistemin ismi de aslında bu tersinir elemanlardan gelmektedir. Akıllı malzemeler (smart materials) olarak tanımlanan bu malzemeler herhangi bir elektriksel alan altında mekanik olarak şekil değiştirebildiği gibi (elektromekanik etki), herhangi bir boyutsal değişiklik sonucunda elektrik sinyali üretebilmektedir (mekanoelektrik etki) (Akıllı yapılar). Akıllı yapılar en geniş şekilde piezoelektrik malzemeler, şekil hafızalı alaşımlar (shape memory alloys, SMAs) ve magnetostriktif malzemeler olarak sınıflandırılabilir.

Piezoelektrik malzemeler ile uçak malzemelerinde oluşan hasarların belirlenmesi ve izlenmesi için çok sayıda araştırma yapılmıştır [26-30]. Bu araştırmalar incelendiğinde uçak kompozitlerinin ve diğer havacılık malzemelerinin piezoelektrik uyarıcılarla oluşturulan Lamb dalgalarıyla incelendiği görülmektedir. Yapıların Lamb dalgalarıyla [19] tahribatsız olarak incelenmesi çok avantajlı bir tekniktir. Lamb dalgaları piezoelektrik uyarıcılarla oluşturulmakta ve yine piezoelektrik algılayıcılarla (sensörler) toplanmaktadır. Bu şekilde yapı içerisindeki hasarlar eş zamanlı olarak takip

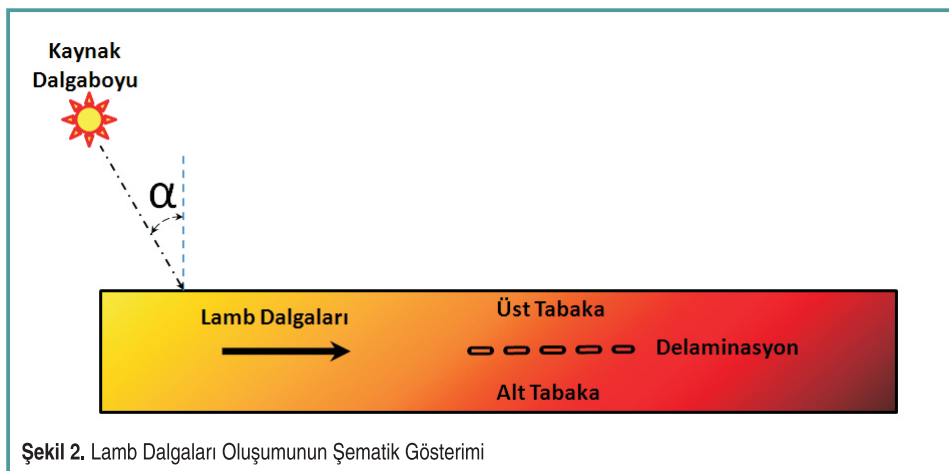
edilmektedir. Lamb dalgaları kullanarak geniş bir paneli incelemek için geleneksel C-taramasında gereksinim duyulan noktasal bir tarama yerine, çizgisel bir tarama gerçekleştirilir. Daha büyük nüfuziyet mesafeleri elde edilebilir ve uyarıcılar ile algılayıcılar arasındaki tüm eksen, kalınlık boyunca sinyal geçişi sağlandığı için araştırılabilir. Delaminasyon hasarının hemen yakınındaki yüzey taraması gerçekleştirilerek delaminasyon alanı büyüklüğünü ölçmek mümkündür. Dalga boyu genliği delaminasyon üzerine geldiğinde azalır. Delaminasyonun bulunduğu derinlikle faz hızının önemli bir değişim göstermediği bilinmektedir. Bağımsız bir darbe sinyalinin genliğindeki düşüş oranı, delaminasyon derinliğine bağlı olarak değişir ve sinyalin hassasiyetinin en fazla arttığı noktalar, numune yüzeyine yakın delaminasyon bölgeleridir. Bu yüzden yöntem; yüzeye dik darbeli ses dalgaları gönderilerek gerçekleştirilen ultrasonik metoda göre daha net sonuçlar ortaya koyar, çünkü ultrasonik metotta delaminasyon bölgesinden geri dönen sinyallerle numunenin arka yüzeyinden dönen sinyaller üst üste binerek girişim yapar. Lamb dalgalarıyla inceleme yönteminde sinyal genliğindeki değişim oranı malzeme yüzeyi ile temas halinde olan probun uç alanına bağlıdır; küçük prob ucu alanı delaminasyon tespitinde daha hassastır. Bu tekniğin dik açılı klasik ultrasonik yöntemine göre avantajı, numune yüzeyini daha kısa sürede tarama potansiyeline sahip olmasıdır.

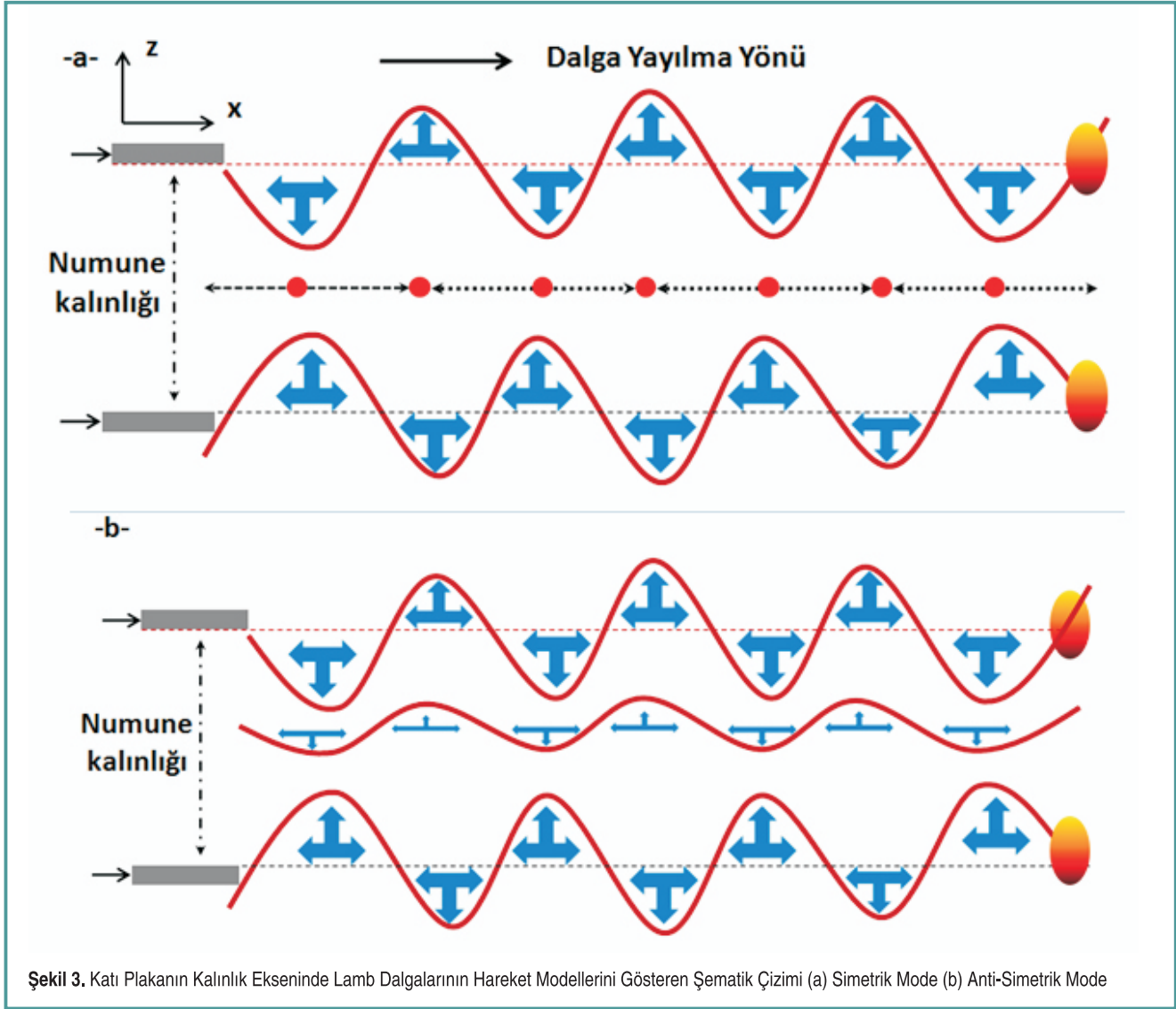
Lamb dalgaları teorisine göre belirli sınır şartları altında, elastik bir plaka içerisine nüfuz eden dalgaların sonsuz sayıda titreşim modu bulunabilir [20]. Bunlar elastik plakaların içindeki gerilim dalgalarıdır ve plaka kalınlığı boyunca nüfuz ederler. Literatürde plakalarda Lamb dalgalarıyla alakalı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir [21]. Farklı araştırmalarda, bu yöntemin metal plakaların tahribatsız muayenesinde kullanılmasından da bahsedilmiştir [22-25].

Şekli 2'de şematik olarak gösterilmiş Lamb dalgaların oluşum açısını veren formül şu şekildedir:

$$V_p = V_L / \sin \alpha$$

Formülde V_L kaynak sıkıştırma hızı, α kaynak açısı ve V_p ise





Şekil 3. Katı Plakanın Kalınlık Ekseninde Lamb Dalgalarının Hareket Modellerini Gösteren Şematik Çizimi (a) Simetrik Mode (b) Anti-Simetrik Mode

plaka boyunca Lamb dalgalarının oluşum hızıdır. Bu yüzden Lamb dalgaları mod değişimiyle üretilebilir. Belirli bir modun faz hızı; kaynak açısına, kaynak dalga frekansına ve plaka kalınlığına bağlıdır. Sabit plaka kalınlığı ve frekansı için seçilmiş modların Lamb dalgalarını, üreticinin kaynak açısını değiştirerek elde etmek mümkündür. Üreteç yansıyan Lamb dalgaları için aynı zamanda alıcı gibi de davranabilir veya üreticinin önüne başka bir alıcı yerleştirilir. Alıcının dönme açısı üreticinin dönme açısıyla aynı olabilir veya numunenin yüzeyine dik açıda olabilir.

Lamb dalgaları kullanıldığında, sinyal üreticinin mekanik enerjiyi malzemeye yeteri kadar iletebilmesi veya malzemeden algılayıcıya gelen sinyallerin yeteri kadar olabilmesi için, üreticinin test numunesine sağlıklı bir şekilde bağlanması gereklidir (Şekil 3). Hava ve katı malzemeler arasındaki uyumsuzluktan doğan yüksek akustik empedansa sahip olan hava, iyi geçirgenliğe sahip bir ortam değildir. Katı ile hava arasındaki sınır tabakada sinyaller, çok büyük

miktarda yansımalar ve çok düşük iletim karakteristiğine sahiptir. Numuneyi tamamen su içine daldırarak iyi bir ara temas sağlanabilir; fakat bu yöntem büyük parçaların incelenmesinde ve saha çalışmalarında uygun değildir. Su jeti probu montajı sıklıkla kullanılırlar; fakat bu problemlerle üreteç ile test numunesi arasında sabit bir basınç elde etmek güçtür. Kuru tip bağlantı tekerlekli problemler kullanılarak başarılabilir. Kuru tip bağlantıda üreteç sızdırmazlığı sağlanmış kauçuk bir tekerlek içinde suya daldırılarak hızlı bir tarama gerçekleştirilebilir fakat hassasiyeti düşüktür.

Lamb dalgaları kompozit malzemelerle deneysel çalışmalar yapan birçok bilim adamı tarafından kullanılmış bir tekniktir. Birçok çalışmada hasarsız malzeme muayenesi için algılayıcı ve uyarıcı olarak PZT (Lead-Zirconate-Titanate) adı verilen kurşun zirkonyum titanat bileşiminden oluşan kristal yapıdaki seramik malzemeler kullanılmıştır. Bu malzemelerle hazırlanan akıllı hasar tespit sistemleri ile Lamb dalgalarından yararlanılarak malzeme içerisindeki çatlaklar ve tabakalar

arası delaminasyonlar incelenmiştir. Akıllı hasar tespit ve izleme sistemlerinde çok sayıda piezoelektrik uyarıcı ve algılayıcılardan oluşan akıllı yapı (akıllı katman, bant vb.) malzeme üzerine yapıştırılmakta ya da yapı içerisine yerleştirilmektedir. Örneğin perçin bağlantılarında oluşan hasarların incelenmesi için piezoelektrik uyarıcı ve algılayıcılar bant şeklinde üretilerek malzeme yüzeyine yapıştırılmıştır. Bu bölüm içerisinde piezoelektrik malzemelerden oluşturulmuş akıllı hasar tespit sistemlerinin uçak kompozitlerinde ve diğer havacılık malzemelerinde gerçekleştirilmiş uygulamaları irdelenecektir.

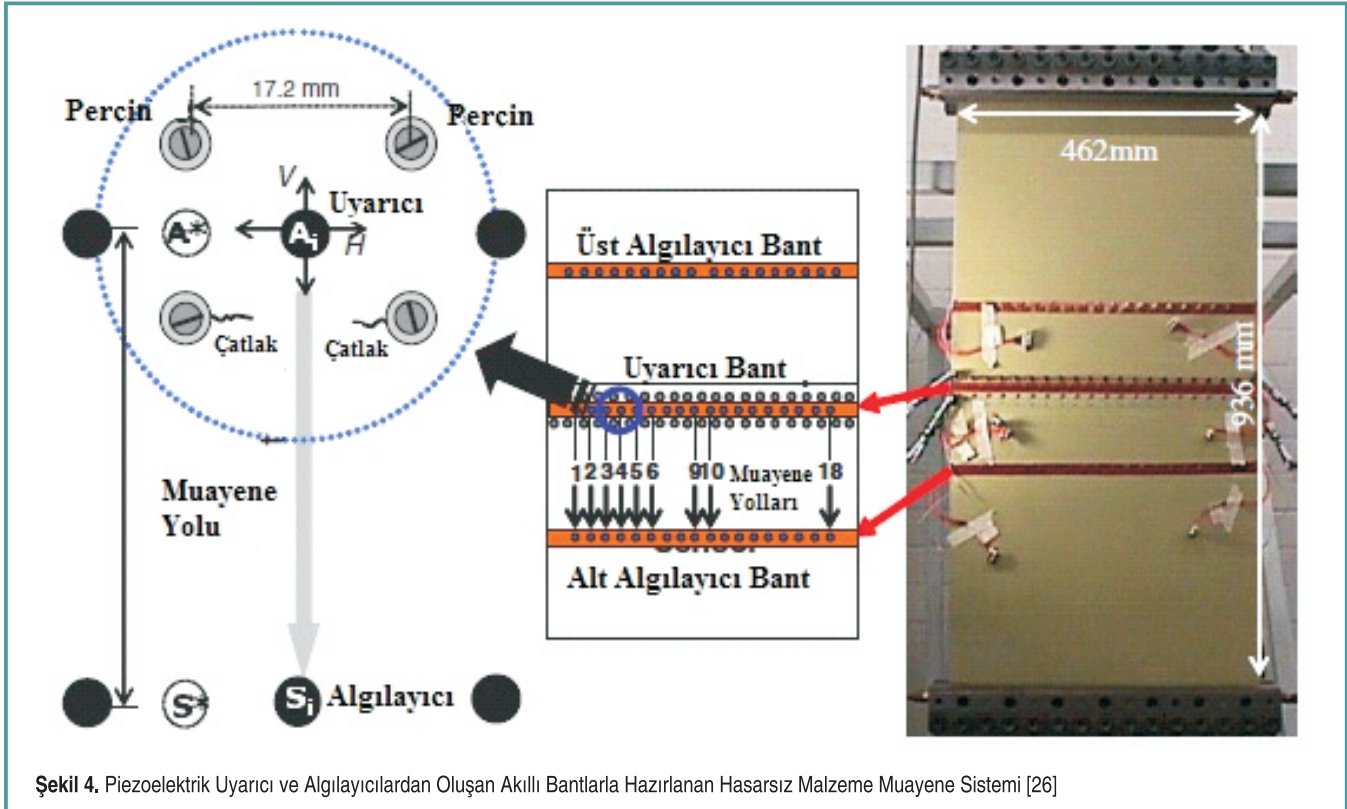
Jeong-Beom Ihn ve Fu-Kuo Chang [26] havacılık malzemelerin çatlak büyümesini ve tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) hasarlarını piezoelektrik uyarıcı/algılayıcı ağlar kullanarak incelemiştir. Hazırladıkları hasar muayene sistemleri ile ultrasonik tarama ve Eddy akım test yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Havacılık malzemelerinde tekrarlı zorlamalar ve atmosfer şartlarının korozif etkileri nedeniyle özellikle perçin bağlantı noktalarında çatlak oluşmaktadır. Jeong-Beom Ihn ve Fu-Kuo Chang yaptıkları çalışmaların ilk bölümünde akıllı yapılar yardımıyla bu çatlakların büyümesini gözlemlemiştir. Perçin bağlantı noktaları etrafına piezoelektrik uyarıcı ve algılayıcı malzemelerden hazırlanan akıllı bantlar (smart strips) yapıştırmışlardır. Şekil 4'te hazırlanmış oldukları hasar muayene sisteminin şematik ve gerçek resimleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde perçin noktalarında şematik olarak gösterilen çatlakların üst tarafına uyarıcı piezoelektrik akıllı

bandın, alt tarafına ise algılayıcı piezoelektrik akıllı bandın yerleştirildiği görülmektedir. Akıllı bantların içerisinde bulunan çok sayıda piezoelektrik uyarıcı ve algılayıcı ile çatlak büyümesi farklı yüklemeye sayılarında izlenmiştir. Bu çalışmalara paralel olarak çatlak büyümesini ultrasonik tarama (USM 25) ve Eddy akım (Defectoscope Af) muayene yöntemleriyle de takip etmişlerdir.

Deneyisel çalışmalarla elde edilen sonuçlar, akıllı hasar tespit sistemlerinin ultrasonik tarama ve Eddy akım yöntemlerine paralel sonuçlar verdiğini göstermiştir. Tüm yöntemlerle malzeme içerisindeki çatlak ilerlemesinin izlenmesi mümkün olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak bu noktada piezoelektrik uyarıcı ve algılayıcı ağlarıyla oluşturulan akıllı hasar muayene yönteminin uygulamasının çok daha kolay olduğu ve daha hızlı sonuçlar elde edildiği ortaya çıkmıştır [26].

Jeong-Beom Ihn ve Fu-Kuo Chang çalışmalarının sonraki bölümlerinde uçak malzemelerinde oluşan çatlakların tamiri için kullanılan kompozit tamir yamaları içerisine yerleştirdikleri piezoelektrik uyarıcı ve algılayıcılardan oluşan akıllı katmanlarla yapı içerisinde bulunan çatlak büyümesini ve tabakalar arası delaminasyonu incelemiştir. Şekil 5'te hazırlanmış oldukları kompozit tamir yaması ve bu yamanın hasarlı alüminyum plaka üzerine montajı gösterilmiştir.

Şekil 6' da gösterildiği gibi kompozit yapı içerisine iki akıllı katman yerleştirilmiştir. Bu iki katman çok sayıda uyarıcı ve algılayıcı piezoelektrik ağlar içermektedir. Şekil 6'da



Şekil 4. Piezoelektrik Uyarıcı ve Algılayıcılardan Oluşan Akıllı Bantlarla Hazırlanan Hasarsız Malzeme Muayene Sistemi [26]