

2000'li Yıllarda Uzay, Havacılık ve Savunma  
Teknolojilerinin Öncelikleri Sempozyumu  
Hava Harp Okulu, Yeşilyurt, İstanbul  
29.30 Nisan 1999

## AKILLI MÜHENDİSLİK YAPILARI VE HAVACILIKTA Kİ UYGULAMALARI

Doç.Dr. Yavuz Y AMAN  
Havacılık Mühendisliği Bölümü  
06531 O.D.T.U- Ankara

### Özet

Akıllı mühendislik yapıları, akıllı malzemeler olarak adlandırılan piezoelectric, electrostrictive, magnetostrictive ve fiber optik gibi malzemelerin pasif yapılara entegre edilmeleriyle elde edilen yapılardır ve pasif yapının istenildiği gibi yönlendirilmesine olanak veren özellikleri ile günümüz mühendislik uygulamalarında gün geçtikçe artan bir hızda kullanılmaktadırlar. Tüm diğer yüksek teknolojiler gibi ilk uygulamaları uzay alanında olan akıllı yapılar ile, uzay yapılarındaki küçük yer değiştirmeleri sağlayabilen ve böylece özellikle yörüngede bulunan antenlerin daha doğru bölgeleri kapsamasına olanak veren çalışmalar yapılmıştır. Diğer mühendislik alanlarında kullanımlar 90 ı yıllarda gerçekleşmiş ve uçak ve helikopter gibi havacılık yapılarındaki titreşime ve gürültüye bağlı olan flutter, tail-buffet ve blade-vortex interaction gibi problemlerin çözümü, kanat profillerinin değiştirilmesi ile göreve uyumlu optimum kanat (mission-adaptive wing) elde edilmesi gibi konularda çalışmalar başlatılmıştır. Günümüzde uzay ve havacılık mühendisliğinden otomotiv mühendisliğine (aktif stispansiyon tasarımı), makina mühendisliğinden (akıllı motorlar) inşaat mühendisliğine (akıllı malzemelerle asma köprülerin yapısal sağlık denetimi, structural health monitoring) kadar çeşitli alanlarda kullanılmaya başlanan akıllı yapılar 21. yüzyıl mühendislik teknolojisine damgasını vuracak bir kavram olmaya adaydır. Bu bildiri de Akıllı Havacılık Yapıların gelişimi ve O.D.T.O. Havacılık Mühendisliği Bölümünde konu ile ilgili sürdürülen çalışmalar sunulacaktır.

### 1. Giriş

AGARD, Aerospace 2020 [1] adı verilen çalışması ile günümüz teknolojisinin 2020 Yılındaki uzay ve havacılık çalışmalarına ve teknolojisine olan etkilerini saptamaya çalışmıştır. Silahların gittikçe karmaşık bir hal alması, ve teknolojinin en son yeniliklerinin uygulanacağı platformlar olmaları, ister istemez silah sistemlerinin fiyatlarını etkilemekte ve giderek ulaşılmaz düzeylere çıkartmaktadır. Ulaşılmaz fiyatların ne şekilde ulaşılır yapılacağı da, yeni ve ucuz malzemelerin teknolojinin hizmetine sokulması, üretim sistemlerinin yenileştirilmesi, entegrasyonda açık mimari ve eş zamanlı mühendislik metodları ile üretim, sivil amaçlı üretimin ve teknolojinin askeri amaçlarla kullanılabilir kılınması gibi faktörlere dayandırılmaktadır . Bunlara ilaveten silah sistemlerinin hedefi şaşırmadan vurmaları, verilen görevi tam ve eksiksiz olarak yerine getirmeleri yani akıllı olmaları, sadece güdüm ve kontrolleri açısından akıllı olmalarını değil, aynı zamanda yapısal olarak da akıllı olmalarını gerektirmektedir. 1990 yıllarından başlayarak A.B.D, DARPA (Defence Advanced Research Projects Agency) akıllı malzemelerin ve yapıların teknoloji de çığır açabilecek bir imkan yarattıklarını kabul etmiş ve bu alandaki çalışmaları desteklemeye başlamıştır .Başlatılan bu çalışmalar ile, titreşim ve gürültünün azaltılmasında, yapıların yapısal sağlıklarının sürdürülmesinde, aerodinamik ve hidrodinamik kontrol alanında önemli gelişmeler ortaya çıkmaya başlamıştır [2]. A.B.D hava, kara ve deniz kuvvetleri ile NASA değişik programlar başlatarak, akıllı yapıların, uçak, helikopter ve denizaltı gibi araçlarda kullanılabilmesini kanıtlamışlardır. Özellikle, titreşim kontrolü ile aerodinamik ve hidrodinamik akım kontrolüne yönelik bu uygulamalarda titreşim ve gürültünün azaltılması, taşıma yüzeylerinin şekil optimizasyonu ile yapıların dinamik ve aeroelastik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır .Ana amaç, akıllı malzemelerin askeri uçaklarda verimli bir şekilde kullanılmasıdır. Kullanım alanları olarak da uçak kanatları ve kontrol yüzeyleri, helikopter rotor elemanları, uçakların hava aıkları ve motor egzost çıkışları gösterilmektedir. çalışmalar bazı ülkelerde birkaç yıldır devam etmekte, bazılarında ise henüz başlamak üzeredir. Konu önemi itibarıyla, Türkiye'nin geri kalmaması gereken bir alandır. Bu

proje ile oluşturulacak alt yapı ve bilgi birikimi ile, akıllı yapılar konusunda, diğer ülkelerin yürütmekte oldukları araştırma konularını ve teknolojilerini yakalamamız mümkün olacaktır.

## 2. Akıllı Yapılar

Akıllı yapılar (smart structures), geometrik ve yapısal özellikleri beklenen görevlerin niteliğine uygun biçimde değiştirilbirm 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. Aktif ya da uyumlu (adaptive) yapılar olarak ta tanımlanabilen bu tür yapılar, aslında pasif yapı ile birlikte uyarıcılar (actuators), algılayıcılar (sensors), ve yönlendiricilerin (controllers) bir arada bulunduğu entegre sistemlerdir. Uyancılar 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). Bu tür malzemelere en iyi örnek, Piezoelektrik malzemelerdir. Piezoelektrik etki gösterebilen çok miktarda malzeme olmasına karşın, genelde bu tür malzemeler iki ana grupta toplanabilir. Birinci grup kristal yapı gösteren ve seramik şeklinde olanlardır. Bunlar içinde en yaygın kullanımı olan PZT (lead-zirconium-titanate) adı verilen kurşun-zirkonyum-titanat bileşimidir. İkinci grup ise piezoelektrik etki gösteren polimerlerdir. PVDF (Polyvinylidene fluoride polymer) bu tür malzemelerden biridir. Piezoelektrik etki gösteren bu malzemelerden yapılan algılayıcı ve uyancılar, yapıların ya yüzeylerine yapıştırılmakta (bonded), ya da yapıya gömülmektedir (embedded). Bu elemanlar akıllı duruma getirilen yapı yönlendiricilerin de yardımıyla kontrol edilebilmekte ve istenmeyen titreşim, gürültü, şekil değiştirme gibi etkiler kolaylıkla ve etkinlikle yok edilebilmektedir.

Günümüzde akıllı malzemelerin ve yapıların geliştirilmesinde iki ana yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan biri farklı malzemeleri atomik ve moleküler düzeylerde sentez ederek akıllı özelliklere sahip yeni malzemeler ortaya çıkarma çalışmalarıdır. İkinci yaklaşım ise özellikleri bilinen parçaların algılayıcı ya da uyarıcı olarak, görev gereklerine göre pasif yapı ile sentez edilmesi sonucu oluşan akıllı yapılarıdır .

Akıllı yapılarda kullanılan tipik algılayıcılar fiber-optikler, piezoelektrik seramikler ve polimerlerdir. Algılayıcılar bölge bölge ya da geniş bir yüzeyi kaplayacak şekilde uygulanabilirler. Fiber-optikler düşük ağırlıkları, küçük boyutları, birim değişikliklere (strain) olan yüksek duyarlılıkları ve elektro-manyetik etkileşim (electro-magnetic interaction) problemlerinin olmaması nedeniyle avantajlıdır. Buna karşın fiber-optikler sinyal üretebilmek için ek bir güç kaynağına ihtiyaç duyarlar ve üretilen sinyal elektriksel olmadığı için ölçümü ve yorumlanması zor olabilir. Piezoelektrik seramikler ve polimerler birim değişikliklere karşı hassastırlar, kolaylıkla ölçülebilen elektrik sinyali verirler, herhangi bir dış güç kaynağına ihtiyaç göstermezler ancak elektro-manyetik etkileşim sorunları vardır ve eğer kompozitlere gömülürlerse elektriksel koruma ( electrical shielding) gereklidir. Bunun yanısıra kullanılacakları sıcaklık aralığı da fiber-optiklere göre daha dardır. Tipik akıllı yapı uyarıcıları ise orijinal şekillerini hafızalarında tutabilen alaşımlar (shape-memory-alloys, SMA), piezoelektrik ve electrostrictive seramikler, magnetostrictive elemanlardır. SMA uyarıcılar sıcaklık nedeni ile malzemede oluşan mikro düzeydeki faz değişimi sonucu çalışırlar. Yüksek uyarıcı kuvvet ve sönüm etkileri gösterirler, material özellikleri değiştirilmek suretiyle faz değişiminin oluşabileceği sıcaklıklar ayarlanabilir. Ancak tepki zamanları çok yavaş olduğu için genelde çok düşük frekanslardaki uygulamalar için etkin olabilirler. Yüksek histerisis'e sahip oldukları için şekil değiştirebilecekleri uygulama sayısı (transformation cycle) sınırlıdır. Piezoelektrik ve electrostrictive seramikler daha geniş bir frekans aralığına, daha hızlı bir tepki zamanına ve oldukça yüksek kuvvet uygulayabilme yeteneğine sahiptirler. Ancak electrostrictive seramikler sıcaklığa karşı çok hassastırlar ve sıcaklıkla, doğrusal olmayan (non-linear) davranış sergileyebilirler. Magnetostrictive elemanlar yüksek kuvvet uygulayabilmelerine karşın, çok ağırdırlar .

Algılayıcılar temel olarak yapıdaki değişimlerin belirlenmesinde, uyarıcılar ise yapıda istenen

değişikliklerin sağlanmasında etkindirler. Bu değişimler ve gerekli olan değişiklikler hem static hem de dinamik özelliklerde olabilir. Örneğin yapıda aşırı bir birim değişiklik saptanırsa, buna neden olan yüzey eğimi ya da yer değiştirmenin giderilmesi için uyancılardan yararlanılır .Başka bir örnek olarak algılayıcı(lar) eğer kanattaki kaldırma kuvvetinin değiştiğini belirlerse; uygun kontrol sinyalleri sayesinde, uyarıcı(lar) kanat kaldırma kuvvetini en uygun seviyeye getirmeye çalışır. Görüldüğü gibi farklı amaçlar için etkin ve uygulaması kolay olabilecek algılayıcı ve uyarıcı konfigürasyonunun tasarlanması, üretimi, uygulanması ve denemesi günümüz araştırmacılarının önündeki en büyük problemlerden biridir.

### 3.Akıllı Havacılık Yapıları ile İlgili Uygulamalar

Akıllı malzemelerin kullanılmasıyla akıllı yapıların oluşturulması, ilk olarak 1968 de Henry Clauser tarafından ortaya atılmıştır [3]. 70 li yılların sonlarında R.L.Forward piezoseramiklerin pasif sönüm sağlayıcılar olarak kullanılmasıyla ilgili çeşitli patentler almıştır [4-5]. Forward ve arkadaşları 1983 te yüzeye yapıştırılmış piezoelektrik uyancı ve algılayıcılar kullanarak ilk başarılı titreşim kontrolünü gerçekleştirmişlerdir [6]. Daha sonra Crawley ve de Luis hem elastik bir yapının yüzeyine yapıştırılan, hem de kompozit bir malzemeye gömülen piezoelektrik elemanların pasif malzeme ile olan etkileşiminin statik ve dinamik modellemesini yapmışlardır. Çalışmada, yapıdaki birim değişikliklerin özelliklerine göre, uyarıcının yerleştirileceği en uygun yerin belirlenmesini sağlayan bir tekniğin geliştirildiği belirtilmiş ve yapının yüzeyinin sürekli bir piezoelektrik tabaka ile kaplanması yerine parça parça piezoelektrik elemanlar konmasının daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır. Bunda temel etken her parçanın ayrı ayrı kontrol edilebilmesidir [7] .

Bicos ve Tracy komplike bir yapıdaki kiriş, plak, kabuk gibi elemanların özelliklerinin bilinmesinin yapıya uyarlanacak algılayıcıların seçimi için önemli bir kriter olduğunu belirtip, fiber-optik algılayıcıların da titreşim kontrolü için kullanılabileceğini belirtmişlerdir [8]. Lee, PVDF malzemelerden yapılmış, ucuz ve komplike şekilli yapılara kolaylıkla uyarlanabilen, pyroelectric etkiye de sahip, ince film şeklindeki piezoelektrik plakaların, kalınlık boyunca olan plaka hareketleri arasındaki ilişkileri doğrusal kabul ederek, analitik modellemesini yapmış ve hem uyarıcı hemde algılayıcı olarak kullanılabilen bu plakaların elektromekanik ve mekanoelektrik özellikleri arasındaki ilişkileri incelemiştir [9] .

Akıllı yapıların kullanıldıkları önemli uygulama alanlarından birisi de çeşitli taşıtların yapısal sağlıklarının izlenmesi ve olası hasarların giderilmesine yönelik çalışmalardır (Structural health monitoring, SHM). Bu yaklaşımın en önemli avantajı hasarların gerçek zamanda belirlenebilmesidir (real-time assesment). Bu alandaki ilk uygulamalar da havacılık ve uzay teknolojisinde gerçekteştirilmiştir. Spillman Jr. ve Fuhr fiber-optik algılayıcılar kullanarak uzay araçlarının yüzeylerine yabancı maddelerin çarpması sonucu oluşabilecek hasarların miktar ve yerlerinin belirlenmesinde (impact detection and localization) kullanılabilecek bir teknik önermişlerdir [10]. Won ve arkadaşları yapıya gömülmüş piezoelektrik algılayıcı ve uyarıcıların kullanıldığı bir uzay kafes sisteminin (space-truss) incelemesini yapıp, bu sistemin titreşimin bastırılmasında (vibration supression) yararlı olabileceğini belirtmişlerdir [11]. Dosch ve arkadaşları bir uzay antenine yapıştırılmış piezoelektrik uyancılar ve algılayıcılar vasıtası ile olası titreşimlerin bastırılmasını amaçlamışlardır. Anten yaklaşık frekanslarda oluşan ve birbirini tekrar eden titreşim biçimlerine (modes) sahip olduğu için birden fazla girdiye ve birden fazla çıktıya (multi-input-multi-output) sahip bir kontrol yöntemi geliştirmişlerdir [12]. Virginia Politeknik Enstitüsündeki araştırmacılar aynı anda hem uyancı hemde algılayıcı görevi gören parça piezoelektrik elemanlar kullanarak çeitli havacılık yapılarındaki SHM problemlerini incelemiştir. Yapısal bütünlüğün izlenmesinde, yüksek frekanslarda yapıdan elde edilen elektriksel impedans cevabının yapının mekanik impedans cevabı ile fonksiyonel olarak eşdeğer olduğunu belirleyen araştırmacılar, elde edilen elektriksel sinyallerin, yapısal özelliklerin ortaya konmasında yararlı olabileceğini belirtmişlerdir. Yapının frekans cevabındaki değişimlerin hasarların tanımlanmasında etkin olduğunu belirten araştırmacılara göre bu teknik kompozit yapıların sağlıklarının izlenmesinde alternatif bir hasarsız gözlem (non-destructive inspection. NDI) yöntemi olarak ta kullanılabilir. Yöntemin eksik yönlerinden birisi yapıdaki, hasar ile ilgili olmayan herhangi bir elektriksel değişimin de hasar olarak algılanabilmesidir. Bu eksikliği gidermeye dönük çalışmalar devam etmektedir. [ 13-

18] .Kalaycıoğlu ve arkadaşları piezoelektrik uyancuların ve fiber-optik algılayıcıların birarada kullanıldığı, titreşimin kontrolüne yönelik aktif bir teknik geliştirmişlerdir [19].

Akıllı yapıların geliştirilmesine ve kullanımına yönelik çalışmalar, havacılık ve uzay endüstrisinde söz sahibi olan veya bu üstün teknolojik ortamda yer almaya çalışan ülkelerin hükümetlerinin de büyük desteğini almaktadır. Bu bağlamda NASA tarafından desteklen çeşitli projeler bulunmaktadır. Bu projelerde uzay yapılarında kullanılan kafes sistemlerinin sürekli izlenmesine ve kontrolüne yönelik çalışmalar önde gelmekte ancak diğer havacılık yapıları ile ilgili çalışmalar da büyük bir hızla sürmektedir. Belli hücum açılarında ve belli kuyruk bölgelerinde çok tehlikeli olan; aşırı titreşime, bunun sonucu olarak ta yorulmaya (fatigue) neden olan buffet probleminin çözüümü için yapılan çalışmalar bunlardan bir grubu oluşturur. Buffet, kanat hücum kenarında oluşan düzensiz girdapların (unsteady vortices at the leading edge of the wing) kuyruğa çarpması ile ortaya çıkar. Piezoelektrik uyarıcılar yardımıyla bu sorunun hafifletilmesi [20], buffet'tan dolayı oluşan tepkinin azaltılması amacıyla piezoelektrik uyancuların kullanıldığı aktif dikey kuyruğun (Active Vertical Tail) olabilirliği [21] bu daldaki çalışmalara örnektir. Aerodinamik ve yapısal dinamik özelliklerinin etkileşmesiyle ortaya çıkan flutter da zararlı titreşimlere neden olan ayrı bir sorundur. Bu konuda piezoelektrik uyarıcılardan yararlanan ve kanattaki flutter'ı azaltmayı hedefleyen çalışmalar bulunmaktadır [22]. Helikopter palalarının burulmalarının SMA ve piezoelektrik uyancılar yardımıyla kontrolü araştırmaları [23], titreşimin azaltılması ve kontrolü yanında farklı uçuş rejimlerinde şekil değiştirebilen akıllı kanat tasarımları ile ilgili çalışmalar da bulunmaktadır [24, 25]. Bu tür kanatlarda sürtünme kuvveti azaltılacak, yakıttan tasarruf sağlanacak, şok dalgalarının oluşmadığı emniyetli bir transonik uçuş sağlanabilecektir .

Akıllı yapıların tasarlanması, geliştirilmesi ve bunların uygulanması ile gelecekte özellikle havacılık ve uzay teknolojisinde büyük atılımların yapılacağı beklenmektedir. Teknolojinin daima en önünde gitmek zorunda olan Havacılık ve Uzay çalışmalarındaki gelişmelerin zamanla tüm dallarda uygulama alanları bulacağı ve akıllı yapıların sadece askeri alanda değil tüm yaşamımızda önemli roller oynayacakları bir gerçektir.

#### **4. ODTU Havacılık Mühendisliği Bölümünde Sürdürülen Çalışmalar**

O.D.T.Ü (Havacılık Mühendisliği Bölümünde yürütölen çalışmaların amacı, akıllı malzemeler kullanılarak, akıllı havacılık yapılarının teorik ve deneysel çalışmalarının yapılabileceği bir teknoloji laboratuvarını oluşturmak; bu laboratuvarda akıllı kiriş ve plaka yapılarının titreşim kontrolü ve yapısal sağlıklarının izlenmesi ile ilgili modellerin geliştirilmesidir. Yüzeye yapıştırılacak piezoelektrik algılayıcı ve uyancuların etkileri ve etkinlikleri alüminyum kirişler üzerinde, yine yüzeye yapıştırılacak ve/veya gömülecek algılayıcı ve uyarıcıların özellikleri ise kompozit kiriş ve plaklar üzerinde denenecektir. Varılmak istenen nokta flutter etkilerinin azaltılması ve kompozit yapılarda yapısal sağlık izleme yöntemlerinin geliştirilmesidir. Kazançlar sadece akademik değil, aynı zamanda uygulamaya yönelik bir niteliğe sahiptir . (Ükemizin sahip olduğu, sayısı ve niteliği günden güne büyük bir hızla artan hava taşıtları özellikle yapısal sağlıklığı sürdürübilmede çeşitli sorunlarla karşılaşmaktadır. Klasik yöntemlerle yapılan kontrol ve bakım işlemleri zaman almakta ve uçuşun durdurulması nedeni ile ağır mali kayıplara neden olmaktadır. Akıllı yapıların geliştirilmesi ile elde edilecek etkin yapısal sağlık izleme yöntemlerinin hava taşıtlarına uyarlanması ile olası sorunlar daha olmadan belirleneceği için hem daha güvenli uçuş rejimleri hem de daha ekonomik uçuş maliyetleri ortaya çıkacaktır. Bu çerçevede de kurulması düşünölen laboratuvar etkin bir modelleme ve deney olanağı sağlayacaktır. Konu ile ilgili olarak bir DPT, bir NATO-RTA projesi sürmektedir.

#### **Kaynaklar**

- [1] "Aerospace 2020", AGARD Advisory Report 360, April 1997
- [2] C. R. Crowe, and J. M. Sater, "Smart Aircraft Structures", NATO AGARD Conference on "Future Aerospace Technology in the Service of the Alliance", April 1997
- [3] H. R. Clauser, "Modern Materials Concepts Make Structure Key to Progress" Materials Engineering, Vol. 68 (6), November 1968, pp. 38-42.

- [4] R. L. Forward, "Electromechanical Transducer-Coupled Mechanical Structure with Negative Capacitance Compensation Circuit", June 19, 1979, U.S. Patent 4,158,787.
- [5] R. L. Forward, "Apparatus and Method for Electronic Damping of Resonances", October 5, 1982, U.S. Patent, 4,352,481.
- [6] R. L. Forward, C. J. Swigert, and M. Obal, "Electronic Damping of a Large Optical Bench", The Shock and Vibration Bulletin, Part 4 Damping and Machinery Dynamics, Bulletin 53, May 1983, pp.51-61.
- [7] E. F. Crawley, J. de Louis, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures", AIAA Journal, October 1989.
- [8] A. S. Bicos, J. J. Tracy, "Structural Considerations for Sensor Selection and Placement", SPIE, Vol. 1170 Fiber Optic Smart Structures and Skins II, 1989.
- [9] C. K. Lee, "Theory of Laminated Piezoelectric Plates for the Design of Distributed Sensors/Actuators. Part I: Governing Equations and Reciprocal Relationships", J. Acoust. Soc. Am. 87(3), March 1990.
- [10] W. B. Spillman Jr., P. L. Fuhr, "Impact Detection and Location System for Smart Skins Applications", SPIE, Vol. 1370 Fiber Optic Smart Structures and Skins III, 1990.
- [11] C. C. Won., J. L. Sulla, D. W. Sparks Jr. and W. K. Belvin, "Application of Piezoelectric Devices to Vibration Suppression", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 17, No.6, November-December 1994.
- [12] J. Dosch, L. Donald and Inmann D., "Modeling and Control for Vibration Suppression of Flexible Active Structure", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 18, No:2 March-April 1995. .
- [13] F. P. Sun, Z. Chaudhry, C. Liang and C. A. Rogers, "Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor-Actuator", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 6-Jan 1995. .
- [14] Z. Chaudhry, T. Joseph, F. Sun, and C. Rogers, "Local-Area Health Monitoring of Aircraft via Piezoelectric Actuator/Sensor Patches", Paper No.2443-29, SPIE 1995 North America Conference on Smart Structures and Materials, San Diego, CA, 26 Feb.-3 March, 1995.
- [15] F. P. Sun, Z. Chaudhry, C. A. Rogers and M. Majmundar, "Automated Real-Time Structure Health Monitoring via Signature Pattern Recognition", SPIE N. American Conference Smart Structures and Materials., San Diego, CA, 26 Feb.-3 March, 1995.
- [16] Z. Chaudhry, F. Lalande, A. Ganino, C. A. Rogers., and J. Chung., "Monitoring Integrity of Composite Patch Structural Repair via Piezoelectric Actuators/Sensors 36<sup>th</sup> AIAA/ ASME/ ASCE/ AHS/ ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, Part 4 New Orleans, LA, April 10-13, 1995.
- [17] F. Sun, C. A. Rogers, and C. Liang, "Structural Frequency Response Function Acquisition via Electric Impedance Measurement of Surface-Bonded Piezoelectric Sensor/ Actuator" 36<sup>th</sup> AIAA/ ASME/ ASCE/ AHS/ ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, Part 5 New Orleans, LA. 1995.
- [18] F. P. Sun, C. Liang, and C. A. Rogers, "Structural Modal Analysis Using Collocated Piezoelectric Actuator/Sensors-An Electromechanical Approach".
- [19] S. Kalaycıoğlu, M. Giray and H. Asmer, "Time-Delay Control of Space Structures Using Embedded Piezoelectric Actuators and Fiber-Optics Sensors".
- [20] R. W. Moses, "Vertical Tail Buffeting Alleviation Using Piezoelectric Actuators", Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, SPIE Volume 3044 (paper 3044-07), 1997.
- [21] R. M. Hauch, J. H. Jacobs, K. Ravindra, and C. Dimas, "Reduction of Vertical Tail Buffet Response Using Active Control", 36<sup>th</sup> Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA-95-1080-CP (Part 4), April 1995, pp.2281-2288.
- [22] A. R. McGowan, J. Heeg, and R. C. Lake, "Results of Wind-Tunnel Testing from the Piezoelectric Aeroelastic Response Tailoring Investigation", 37<sup>th</sup> Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, AIAA, Paper No.96-1511, 1996
- [23] R. C. Derham and N. W. Hagood, "Rotor Design Using Smart Materials to Actively Twist Blades", American Helicopter Society 52<sup>nd</sup> Annual Forum, June 4-6, 1996, 10 pages.

[24] J. N. Kudva, A. J. Lockyer, and K. Appa, "Adaptive Aircraft Wing" AGARD Lecture Series 205 Smart Structures and Materials: Implications for Military Aircraft of New Generation, October 1996, Paper 10, pp.10-1- 10-5.

[25] F. Austin, W. C. Van Nostrand, M. Siclari, P. Aidala, and R. Clifford, "Design and Performance Predictions of Smart Wing for Transonic Cruise", Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, SPIE Volume 2721, 1996, pp. 17-25.