

# Cıvatalı Birleştirmelerdeki Hasarların Lamb Dalgası Tekniğiyle Bulunması

Mustafa DEMETGÜL<sup>1</sup>, Volkan Yusuf ŞENYÜREK<sup>2</sup>, Hüseyin YÜCE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, Göztepe, İstanbul

<sup>2</sup>Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Göztepe, İstanbul

## ÖZET

Bu çalışmada, cıvatalı birleştirmeye sahip yapılarıdaki cıvata hasarlarının gerçek zamanlı bulunması hedeflenmektedir. Yapılan çalışma ile Alüminyum 2024 plakaları birleştiren cıvatalardaki gevşemeler bulunabilmektedir. Cıvatalı birleştirmelerde Lamb dalgaları türlerinden olan düşük frekanslı asimetrik A0 ve yüksek frekanslı simetrik S0 modlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuç olarak S0 modunun bu tip birleştirmelerde hasar belirlenmesinde kullanılmayacağını görülmüştür. S0 modunda cıvataların İletilen enerji çok zayıflattığı ve cıvatalardan enerji çok büyük kısmına geri yansıttığı ortaya konulmuştur. A0 modunun ise daha uygun olduğu görülmüştür. Sinyallerin birleştirme bölgesinin diğer kısmına daha az kayıpla geçtiği, hem de yansıma özelliği barındırdığı görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Lamb dalgası, Yapısal durum izleme.

## Damage Detection in Bolted Joint by Lamb Wave Technique

### ABSTRACT

Lamb waves are a type of ultrasonic waves has a wide range of applications in non-destructive testing. Most of the studies used simple and flat structures for breaking, cracking or corrosion damages. In this study, the detection of damage in the welding is examined. Two 4.5mm thickness AL2024 plates joined by overlay welding method. Damage was applied to the weld region gradually. Three piezoelectric (PZT) discs were used to create surface waves and to monitor their propagation. For better examination, the envelopes of the monitored signals were calculated by using the Hilbert transform. Damages occurring in the weld region, has led to reflections and attenuation in waves. The study indicated that degradation occurring in the weld can be identified with the Lamb wave technique.

**Keywords:** Lamb wave, Hilbert transform, structural health monitoring.

### I. GİRİŞ

Amerika Birleşik Devletleri uçakların bakım ve onarımı, araç ve gereçler için her yıl 200 milyon doların üstünde harcamaktadır. Bakım ve onarım bu oranın üçte birini kapsamaktadır. Var olan yapıların yaşlarının ilerlemesi ve bakım ve onarım maliyeti endişelerini de beraberinde getirmektedir. Yeni tasarlanan sistemlerde yapısal durum izlemenin koyulması yapının geri dönüşüm maliyetini düşürmektedir. Yapısal durum izleme parçaların optimum kullanılması, bozulmadan dolayı aksama süresini en aza indirmesi, ciddi hasarları önlemesi, düzenli bakım, görülmeyen kısımlardaki arızaları bulmak için parçaların sökülmesi ve günlük bakım iş gücünü azaltmaktadır. Sonuç olarak bunlar iş gücünü, iş kaybını, insan hatalarını azaltmakta ve emniyeti artırmaktadır. Güvenliğin geliştirilmesi bu çalışmanın en önemli yapıma sebebidir. Yeterli bakım yapılmadığı için birçok uçak kazası, köprülerin ve binaların

yıkılması olayları olmuştur [1-3].

Yapısal durum izleme iki türdür. Bunlar aktif ve pasif yapısal durum izlemedirler. Pasif yapısal durum izlemede birçok parametre göz önünde bulundurulmaktadır. Bunlar rüzgar hızı, rüzgar türbülansı, titreşim seviyesi, G faktörleri ve kritik bölgelerdeki gerilmeler vb. gibi birçok faktör izlenmektedir. Bu yöntem kullanışlı bir yöntemdir. Fakat yapının arızalı olup olmadığı anlık olarak tespit edilememektedir. Bunun aksine aktif yapısal durum izlemede arızayı teşhis etmekte ve konumu bulunabilmektedir. Bu metot tahribatsız muayene ile benzer özelliktedir. Son yıllarda birçok teknoloji yapısal durum izleme ile ilişkisi bulunan tahribatsız muayene tekniğinin araştırılması sonucu ortaya çıkmıştır. Lamb dalgası tekniği en sık kullanılan tahribatsız muayene tekniklerindedir [4].

Lamb dalgası tekniği ile büyük bir alanı taramak mümkün

olduğu için kullanılacak sensör sayısını azaltmaktadır[5]. Lamb dalgaları iki boyutlu akustik dalgalar. Bunlar genelde ince plakalarda oluşan ve plaka dalgası olarak adlandırılan dalgalar. Bunların avantajları, hızlı tarama kabiliyeti, düşük maliyet [6], dalgalar bütün yapıda alıcı ve verici sensör arasında oluşmaktadır ve ciddi mesafelerde çalışabilmektedir [7].

Lamb dalga tekniği yeni ve referans değere ihtiyaç duymadan birçok hatayı teşhis edebilmektedir [8]. Lamb dalgaları simetrik ve asimetrik olarak iki şekildedir. Piezo seramik sensörler de Lamb dalgası tekniği kullanılırken simetrik ve asimetrik dalgalar birbirlerinin içine girerek karmaşa oluşturmaktadırlar. Bunun önüne geçmek için birbirine zıt yüzeylere piezo seramik sensörleri yerleştirilmektedir.

Metalik ve kompozit malzemeler ileri düzey uzay araçlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yapılarda farklı sebeplerden aşınma, yırtılma ve değişik sıra dışı hasarlar oluşmaktadır. Bunun sonucunda çok ciddi ve maddi hasarlar meydana gelmektedir. Bu hasarlara metalik malzemelerde çatlaklar, korozyon, yorulma ve vuruşlar örnek verilebilir. Büyük hasarların çıplak göz ile görmek mümkündür fakat iç ve dış küçük hasarların teşhisi için farklı geleneksel hasar vermeyen ölçüm tekniklere ihtiyaç vardır. Bu teknikler endüksiyon akım, ultrason, röntgen vb. gibi tekniklerdir. Bu tekniklerle arıza teşhisi yapmak mümkündür. Fakat bunlar belirli malzemelerde, yapılarda kullanılabilir ve bu teknikle hasarın miktarının tespiti zordur. Ayrıca off-line olarak çalışmakta, büyük test aletlerine ihtiyaç duyulmakta, bunların kullanılması için sistemin montajının sökülmesi gerekmekte ve bunların resminin çekilip okunması, yorum yapılabilmesi için uzman kişilere ihtiyaç vardır. Buda iş gücü maliyetini artırmakta ve bunların yorumlanmasından dolayı zaman kaybına neden olmaktadır. Bir diğer teknik çok noktalı lazer titreşim ölçer ile dalgaları ölçüp çıkarım yapma tekniğidir. Bu teknik maddi olarak maliyetlidir. Bunun yanında yeni kullanılan bazı teknikler vardır. Bunlar, süpürme sinüs dalgası ve Lamb dalgası teknikleridir. Son yıllarda titreşim tabanlı yapısal durum izleme (SHM) ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Çünkü yapıların dinamik davranışları hasarlardan etkilenmektedir. Arızanın ortaya çıkması ve ilerlemesini rezonans frekansı ile bulmak mümkündür. Fakat çevresel etkiler bu frekans değerini etkilemektedir [9].

Yapısal durum izleme ile ilgili birçok yöntem kullanılmıştır. Bunlar ses dalgası, ses yayılımı tekniği [10], gerilim ölçümü [11], titreşim tabanlı arıza teşhisi [12], Lamb dalgası [7], hasar indeksleme [13], dalga analizi sonlu elemanlar yöntemi, sinyal işleme teknikleri, Yapay Sinir Ağları [14], genetik algoritma [15], Dalgacık (wavelet) analizi tekniği

[16], frekans yanıtı [17], güdümlü ses teknikleridir.

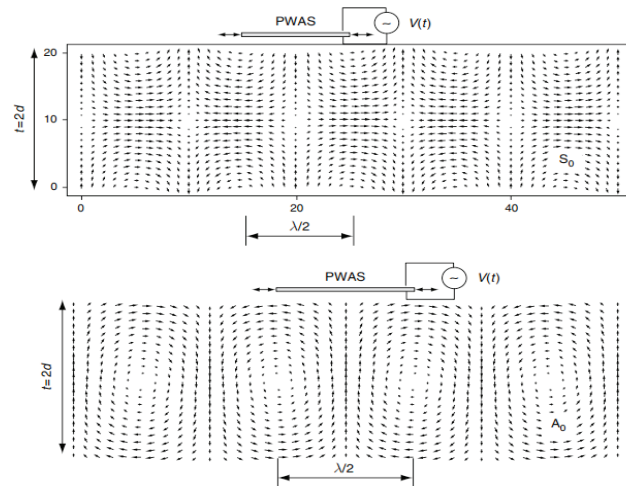
Yapısal durum izleme çalışmalarında makro fiber kompozit, fiber Bragg grating, fiber optik [18], gerilimölçer [10], piezo seramik, PZT, ses yayılımı [19], lazer titreşim ölçer sensörleri kullanılmaktadır.

Yapısal durum izleme ile çeşitli arızaların teşhisi yapılmaktadır. Bunlar yapışkan bozuklukları [18], alüminyum ve kompozit malzemelerin birleştirmeleri [20], yapışkan ile birleştirmelerde yapışkanlarda farklı durumlarda meydana gelen hasarların tespiti [21], metal yapılarda korozyonun izlenmesi [22], piezo elektrik disklerin plakalara yapıştırıldığı yapışkanlarda meydana gelen hasarlar [23], sensör dizileri ile arıza teşhisi [41] ve çoklu etken tekniği bu çalışmalardan bazılarıdır [24].

Uçak gövdesinde ve birçok makede birleştirmelerdeki problemin gerçek zamanlı olarak tespit edilmesi çok önemlidir. Bu çalışmada, vidalı birleştirmelerde vida gevşekliklerinin Lamb dalga tekniği ile bulunması gösterilmiştir. Farklı yerlerdeki cıvataların gevşemeleri simüle edilmiştir. Bu tekniğin cıvata gevşemelerin bulunmasında başarılı olduğu ispatlanmıştır.

## II. LAMB DALGASI

PWAS (Piezoelectric Wafer Active Sensors) sensörler elektriksel uyarım altında yapıştırıldığı katmana genişleme ve büzülme ile salınımı transfer ederler. Bu işlem sırasında birçok faktör dalga davranışı üzerinde etkilidir. Katman kalınlığı, PWAS geometrisi, sensörün kalınlığı ve plaka malzemesi bunlardan bazılarıdır. Şekil 1 PWAS ve S<sub>0</sub> ve A<sub>0</sub> Lamb modları arasındaki bağlaşımı göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi maksimum bağlaşım PWAS boyunun yarım dalga boyunun tek katları olduğunda sağlanmıştır.

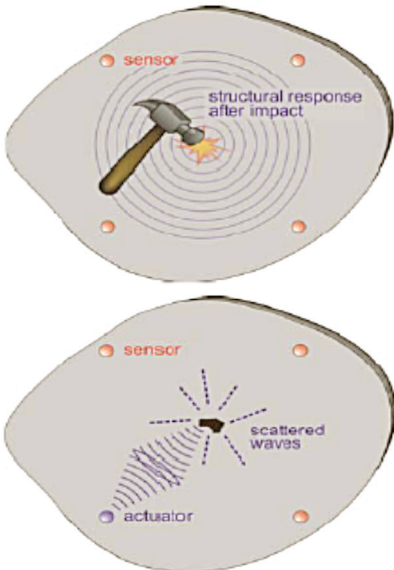


Şekil 1. Lamb dalgasının farklı şekillerde yayılımı.

### III. AKTİF VE PASİF YAPISAL DURUM İZLEME

Yapısal durum izleme yapısal değişiklikleri izlemek için çok sayıda sensör ağına ihtiyaç duymaktadır. Yapısal durum izlemede iki tür sensör tabanlı teşhis ve izleme yapılır. Bunlar Aktif ve Pasif yapısal durum izlemedir. Çalışmaların büyük çoğunluğunda piezoelektrik aktif durum izlemede kullanılmaktadır. Piezoelektrik sensörler sinyal üretmede ve plakalardaki sinyallerin toplanmasında ve hasarın yerinin ve miktarının teşhisinde kullanılmaktadır[25]. Pasif durum izleme çevresel yük değişimleri, gerilmeleri, darbelerin izlenmesinde çok etkili bir yapısal durum izleme tekniğidir. Fakat hasarın yeri ve miktarının bulunması konusunda çok güvenilir ve hassas değildir. Buna rağmen pasif durum izleme ile hasarın boyutunu ve yerini kabaca tahmin etmek mümkündür. Pasif durum izlemede uyarıcı sensöre ihtiyaç yoktur. Az bir donanım ile çalışmak mümkündür. Pasif durum izleme genelde darbelerin izlenmesinde kullanılan yapısal durum izlemenin alt dalıdır.

Aktif algılama tekniği ile yapının yeniden tanımlanması ve sorgulanması ile kalan ömrü tahmin edilmektedir. Aktif yapısal durum izleme sinyal üreten sensöre değişik sayılarda kare ya da sinüs dalgalar gönderilir. Sensor yapıda bir dalga oluşturur. Bu dalgalar alıcı sensörlerden alınır. Yapıdaki hasarın boyuna ve büyüklüğüne göre alınan Lamb dalgasının şekli değişmektedir. Aktif yapısal durum izlemede giriş dalgası ile alınan dalgalar arasında karşılaştırma yapılmaktadır. Bu teknik hasar miktarını ve yerini bulmada etkili olmasına rağmen çok miktarda donanıma ve güç kaynağına ihtiyacı vardır. Aktif ve pasif durum izleme Şekil 2’de gösterilmiştir [26].

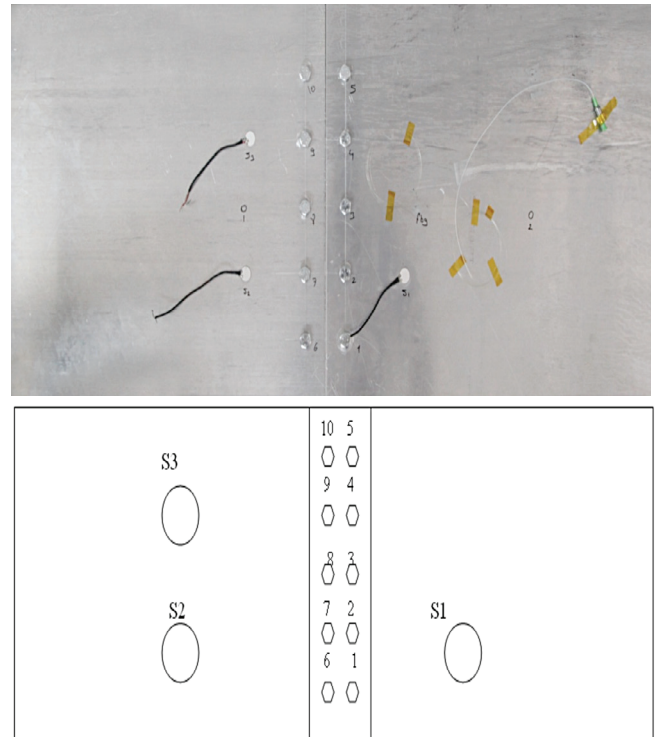


Şekil 2. Aktif ve Pasif Yapısal Durum İzleme [27]

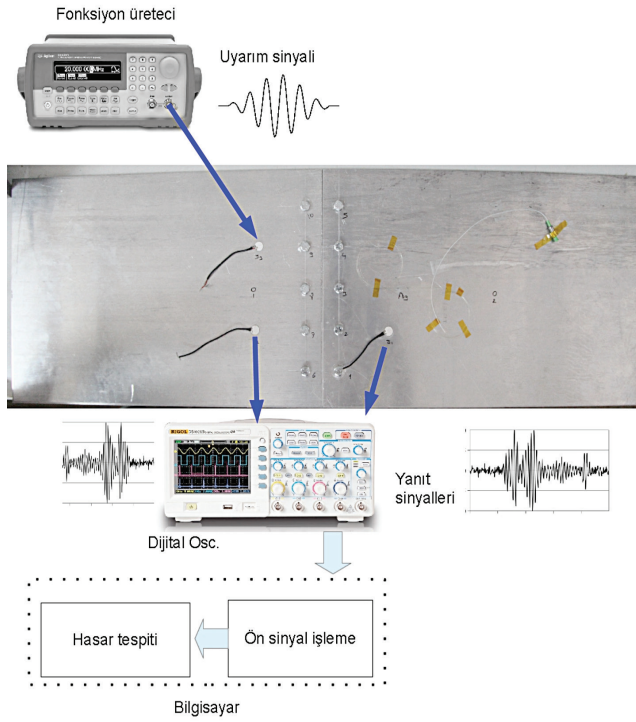
### IV. DENEY DÜZENEGİ

Bu çalışmada cıvata ile birleştirilmiş 320x500 mm boyutlarında iki adet alüminyum 2024 plaka için vida gevşemelerinin tespiti için Lamb dalga tekniğinin kullanılabilirliği incelenmiştir. Plakanın kalınlığı 4.5 mm dir. Üç adet PWAS sensör farklı konumlara yerleştirilerek vida birleştirmelerde uygun konumlar bulunmaya çalışılmıştır. Lamb tekniği simetrik ve antisimetrik olarak uygulanarak dalga modu ile performans arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Şekil 3 de vidalı birleştirme ve sensör konumları görülmektedir. Birleştirme 10cm eninde bir AL-2024 ile yapılmıştır ve 10 adet cıvata kullanılmıştır. Cıvatalar 6Nm tork ile sıkılmışlardır. Deneysel düzenek Şekil 4 de görülmektedir. Lamb dalgasının oluşturulması için Hamming pencerelemiş 6 tekrarlık 60kHz ve 300kHz sinüs formulu sinyaller kullanılmıştır. Bu dalga formu bir fonksiyon üretici (Agilent 33220) tarafından üretilerek bir PWAS sensörden uygulanmıştır. Diğer iki sensörden sayısal osiloskop (Rigol DS1104B) kullanılarak alınan işaretler 2.5MSa hızında örneklenerek bilgisayar ortamına aktarılmış ve tüm analizler MATLAB ortamında yapılmıştır. PWAS sensörler 12mm çapında ve 0.2mm kalınlığındadır.

Hasarsız yapıda tüm cıvatalar tork kontrollü bir anahtar ile 6Nm şiddetinde sıkılmıştır. Deney setinde değişik hasar senaryoları Tablo 1 gösterilmiştir;



Şekil 3. Vidalı birleştirilmiş AL-2024 ve sensörler.



Şekil 4. Deneysel prensip şema.

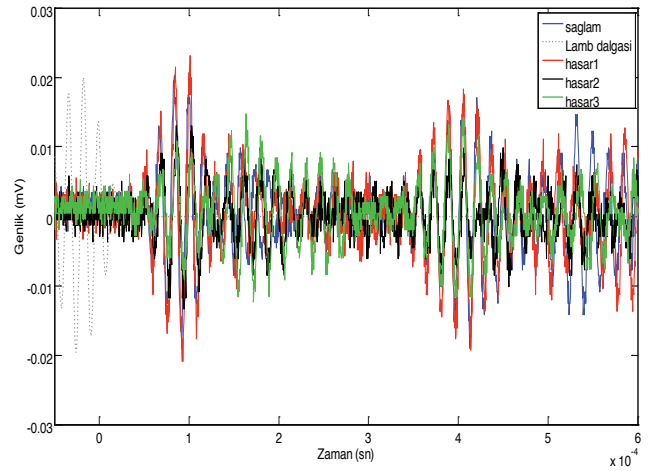
Tablo 1. Hasar senaryoları

Hasar No	Yöntem	Açıklama
1	2 numaralı cıvata 2Nm tork olarak sıkılmıştır	Diğer cıvatalar 6Nm olarak sıkılmıştır
2	2 numaralı cıvata 2Nm, 7 numaralı cıvata 1Nm olarak ayarlanmıştır	Diğerleri 6 Nm sıkılmıştır
3	1,2,6,7 nolu vidalar 2Nm sıkılmıştır	Diğerleri 6 Nm sıkılmıştır
4	4,5,9,10 nolu vidalar 2Nm olarak sıkılmıştır	Diğerleri 6 Nm sıkılmıştır

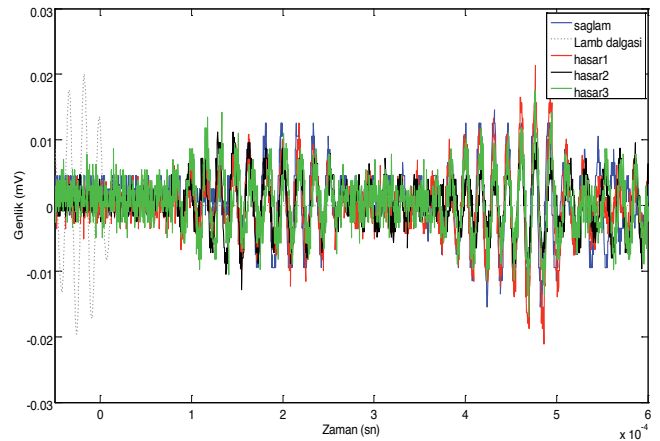
## V. DENEYSEL BULGULAR

Aşağıdaki grafikler A0 moduna ait kayıtlara ilişkin sonuçları göstermektedir. Bu modda Lamb dalgasının grup hız yaklaşık 1700m/s dir. Uyarım noktası S1 ve alıcı sensör arası mesafe 20cm dir ve bu yol 117us de kat edilmiştir(şekil 5). Şekil 5 de Lamb sinyalinin gönderilmesinden yaklaşık 180us sonra bir dalganın S2 ye ulaştığı görülmektedir. Bu süre uçuş süresi (TOF) olarak adlandırılır. Dalga hızı göz önüne alındığında dalganın levhaların birleştirme noktalarından ve birleştirmek için kullanılan alttaki levha parçasının kenarlarından da

yansıdığını göstermektedir. Hasar 1 de bir adet vidanın gevşemesi durumunda S2'ye ulaşan ilk sinyal genliğinde bir azalma olmamıştır. Yansıyarak gelen dalga da ise zaman gecikmesi görülmüştür. Hasar 2 uygulandığında ilk ulaşan dalga genliği azalmış, yansıyarak gelen dalga genliği ise artış göstermiştir. Hasar 3 de 4 vida gevşetildiğinde sensöre direkt ulaşan sinyal genliği daha da azalmış yansıyarak gelen sinyal artmıştır. Şekil 6 incelenecek olursa uyarıcı sensörün karşısındaki bir vidanın gevşemesi S3 tarafından anlaşılacaktır. 2 ve 4 vida gevşediğinde yaklaşık 200us deki genlik azalmıştır. 110us civarlarında ise yeni bir dalga görülmeye başlamıştır.



Şekil 5. A0 modunda S1 sensörünün uyarımı ve S2 sensöründen alınan hasara bağlı sinyaller.

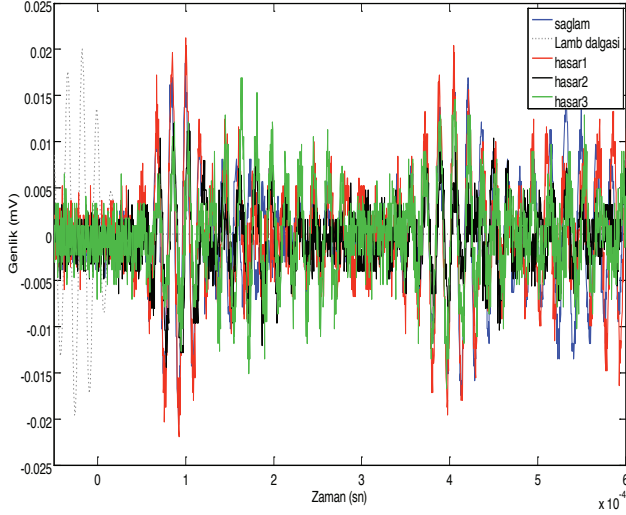


Şekil 6. A0 modunda S1 sensörünün uyarımı ve S3 sensöründen alınan hasara bağlı sinyaller.

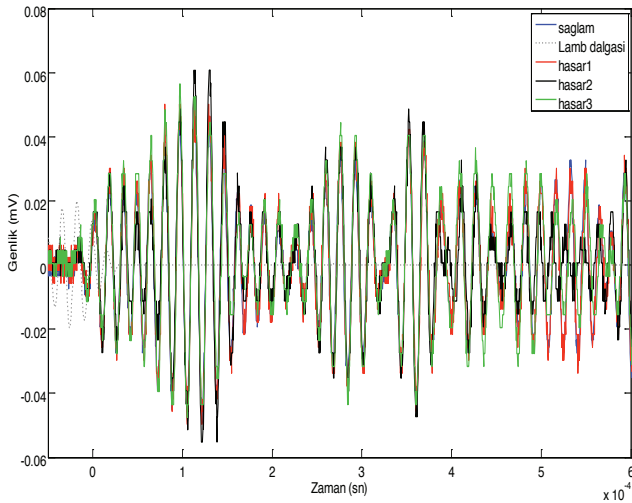
Lamb dalgasının S2 den verilerek S1 den yanıtların alındığı durumda sonuçlar şekil 5 deki ile aynı elde edilmiştir



(şekil 7). S3 ile toplanan sinyaller incelendiğinde ise vida gevşemelerinin ilk ulaşan sinyaller tarafından tespit edilemediği görülmüştür (Şekil 8).

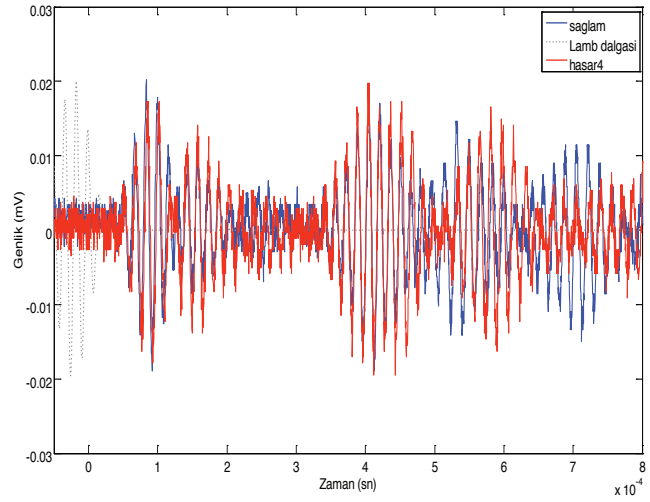


**Şekil 7.** A0 modunda S2 sensorunun uyarımı ve S1 sensorundan alınan hasara bağlı sinyaller.

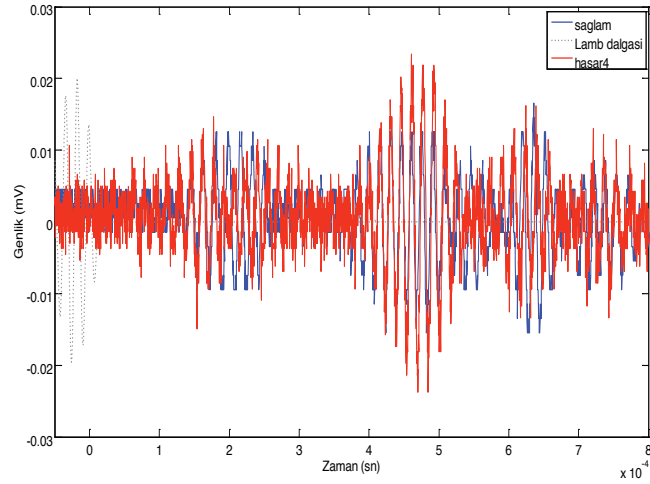


**Şekil 8.** A0 modunda S2 sensorunun uyarımı ve S3 sensorundan alınan hasara bağlı sinyaller.

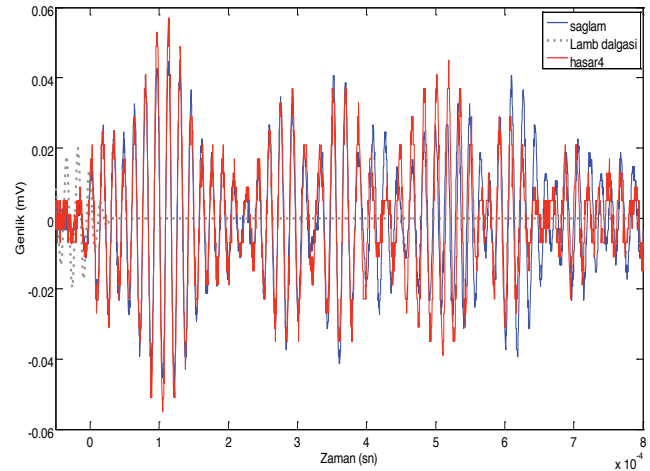
Hasar 4'ün uygulanması durumunda S1 uyarıldığında S2 sensöründen alınan sinyal değişiminin 600us de olduğunu göstermiştir. Buradaki sinyal voltajı vidaların gevşemesi ile yükselmiştir (şekil 9). S3 den elde edilen sinyalde ise ilk ulaşan dalga genliği azalmıştır (şekil 10). Şekil 11 de ise S2'nin uyarılarak S3 den yansımalar ile alınan sinyal görülmektedir değişim ilk kısımda görülmemektedir. 500us de genlik yükselmesi görülmüştür.



**Şekil 9.** Hasar 4'e ilişkin S1'in uyarılması ve S2'den alınan yanıt.

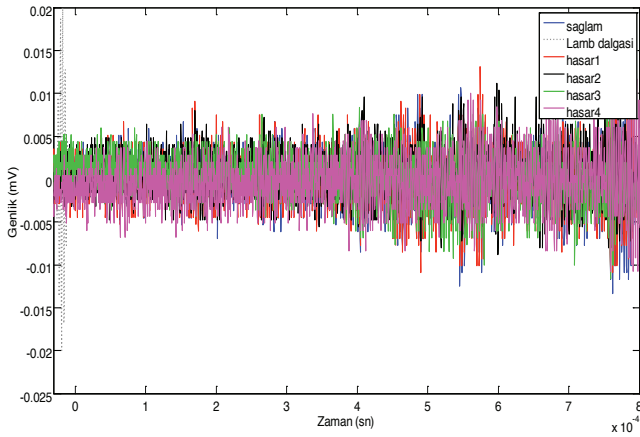


**Şekil 10.** Hasar 4'e ilişkin S1'in uyarılması ve S3'den alınan yanıt.

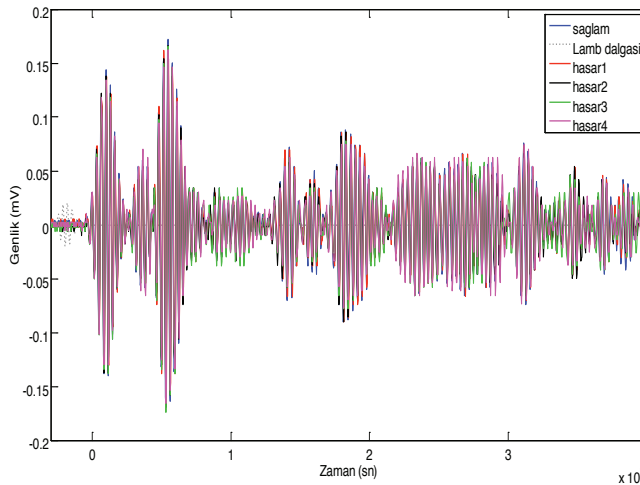


**Şekil 11.** Hasar 4'e ilişkin S2'in uyarılması ve S3'den alınan yanıt.

Yüksek frekanslı simetrik S0 dalgası kullanıldığında elde edilen sonuçlar şekil 12 ve 13 da görülmektedir. Şekil 12 de Lamb dalgasının birleştirme bölgesinin diğer kısmına çok düşük bir seviyede geçtiğini göstermektedir. Şekil 13 de ise yansıma katsayısının çok yüksek olduğu yani gönderilen dalganın büyük kısmının geri yansıdığı görülmektedir. Hasar senaryolarına ise belirgin bir tepki göstermemiştir.



**Şekil 12.** S0 modunda S1 tarafından uyarılan ve S2 ile alınan sinyaller.



**Şekil 13.** S0 modunda S2 tarafından uyarılan ve S3 ile alınan sinyaller.

## VI. SONUÇ

Yapısal durum izleme yükselen bir teknoloji olarak arızalara karşı güvelliği artırmakta, geri dönüşüm maliyetlerini azaltmakta ve devamlı durum izleme sistemlerini geliştirmektedir. Yapısal durum izleme bir veya daha çok tahribatsız muayene yöntemini hızlı, doğru ve insan gücünü minimize eden arıza teşhisi tekniğini bütünleştirmektedir.

Uçak yapılarında küçük hasarların ciddi, maliyetli arızalara ve pahalı muayenelere neden olduğundan en önemli harcamalardan biri yapısal durum izleme sistemleri geliştirme çalışmalarıdır.

Cıvatalı birleştirmelerde düşük frekanslı A0 ve yüksek frekanslı S0 modlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuçlar S0 modunun bu tip birleştirmelerde hasar belirlenmesinde kullanılamayacağını göstermiştir. İletilen enerji çok düşük yansıyan enerji çok fazla olmaktadır. Bunun nedeni bu frekansta dalga boyunun daha küçük olmasıdır. Küçük dalgaboylu dalgalar birleştirme bölgesinden büyük oranda geri yansımaktadır.

A0 modu ise daha uygundur. Hem birleştirme bölgesinin diğer kısmına daha az kayıpla geçebilmekte

hem de yansıma özelliği barındırmaktadır. Bu sayede ilk ulaşan sinyaller ve yansıyan sinyaller incelenerek hasar belirleme yapılabilirliği mümkündür.

Sensör konumları açısından ise gevşetilmiş vida bölgesine yakın olanlar daha iyi sonuç vermektedir. Yansıyan gelen dalgalarla göre analiz yapılmak istenirse belirli bir süreden sonraki dalga paketlerindeki değişim incelenmelidir. Dalga paketlerinde birleştirme noktasından yansıyan gelen dalgalar vidalardaki gevşemelere daha duyarlıdır. Cıvataların gevşeme miktarı yöntem ile belirleme bilir. Fakat cıvata uzaklığını belirlemek zordur. Çünkü Lamb dalgaları cıvatalardan ziyade iki metal plakanın birleşme bölgesinden geri yansımaktadır. Karşılıklı sensör sayısını artırarak hangi cıvatalarda sorun olduğu tespit edilebilir. Bu çalışma ile çok düşük maliyetlerle bu sistemler uçaklar ve makinelerin kritik bölgelerinde kullanılabilir olduğu gösterilmiştir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK'ın 110M236 numaralı projesi tarafından desteklenmiştir. Ayrıca THY Teknik AŞ. 'ye yardımlarından dolayı teşekkür ederiz.

## KAYNAKÇA

- [1] P. Verboven, E. Parloo, P. Guillaume and M. Van Overmeire. (2002). Autonomous structural health monitoring part I: modal parameter estimation and tracking. Mechanical Systems and Signal Processing, 16 (4), 637–657.
- [2] Balageas, D., Fritzen, C. P., & Güemes, A. (Eds.). (2006). Structural health monitoring (Vol. 493). London: ISTE
- [3] Inman, D. J., Farrar, C. R., Lopes, V., & Steffen, V.

- (2005). *Damage Prognosis for Aerospace, Civil, and Mechanical Systems*. 2005. ISBN 0-470-86907-0. John Wiley & Sons Ltd.
- [4] Su, Z., Ye, L., & Lu, Y. (2006). Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review. *Journal of sound and vibration*, 295(3), 753-780.
- [5] Morassi, A., & Vestroni, F. (2008). *Dynamic methods for damage detection in structures (Vol. 499)*. Springer Science & Business Media.
- [6] Ostachowicz, W., Kudela, P., Malinowski, P., & Wandowski, T. (2009). Damage localisation in plate-like structures based on PZT sensors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(6), 1805-1829.
- [7] Diamanti, K., Soutis, C., & Hodgkinson, J. M. (2005). Lamb waves for the non-destructive inspection of monolithic and sandwich composite beams. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 36(2), 189-195.
- [8] Xu, B., & Giurgiutiu, V. (2007). Single mode tuning effects on Lamb wave time reversal with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 26(2-4), 123-134.
- [9] Giurgiutiu, V. (2007). *Structural health monitoring: with piezoelectric wafer active sensors*. Academic Press.
- [10] Lee, S. J., Sohn, H., & Hong, J. W. (2010). Time reversal based piezoelectric transducer self-diagnosis under varying temperature. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 29(2), 75-91.
- [11] Moniz, L., Nichols, J. M., Nichols, C. J., Seaver, M., Trickey, S. T., Todd, M. D., & Virgin, L. N. (2005). A multivariate, attractor-based approach to structural health monitoring. *Journal of Sound and Vibration*, 283(1), 295-310.
- [12] Nichols, J. M., Virgin, L. N., Todd, M. D., & Nichols, J. D. (2003). On the use of attractor dimension as a feature in structural health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(6), 1305-1320.
- [13] Banerjee, S., Ricci, F., Monaco, E., & Mal, A. (2009). A wave propagation and vibration-based approach for damage identification in structural components. *Journal of Sound and Vibration*, 322(1), 167-183.
- [14] Katsikeros, C. E., & Labeas, G. N. (2009). Development and validation of a strain-based structural health monitoring system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(2), 372-383.
- [15] Acciani, G., Brunetti, G., Fornarelli, G., & Giaquinto, A. (2010). Angular and axial evaluation of superficial defects on non-accessible pipes by wavelet transform and neural network-based classification. *Ultrasonics*, 50(1), 13-25.
- [16] Su, Z., Ye, L., & Bu, X. (2002). A damage identification technique for CF/EP composite laminates using distributed piezoelectric transducers. *Composite structures*, 57(1), 465-471.
- [17] Kim, Y. H., Kim, D. H., Han, J. H., & Kim, C. G. (2007). Damage assessment in layered composites using spectral analysis and Lamb wave. *Composites Part B: Engineering*, 38(7), 800-809.
- [18] Leng, J., & Asundi, A. (2003). Structural health monitoring of smart composite materials by using EFPI and FBG sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 103(3), 330-340.
- [19] Rucka, M. (2010). Experimental and numerical study on damage detection in an L-joint using guided wave propagation. *Journal of Sound and Vibration*, 329(10), 1760-1779.
- [20] Lu, Y., Ye, L., Su, Z., & Yang, C. (2008). Quantitative assessment of through-thickness crack size based on Lamb wave scattering in aluminium plates. *Ndt & E International*, 41(1), 59-68.
- [21] Fasel, T. R., & Todd, M. D. (2010). Chaotic insonification for health monitoring of an adhesively bonded composite stiffened panel. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(5), 1420-1430.
- [22] J. S. Popovics, G. E. Gallo, P.L. Chapman. (2009). *Corrosion Monitoring of Metals with an Active Magnetic Sensing Scheme*, Structural Health Monitoring Conference, Stanford University, California, USA.
- [23] Yu, L., & Giurgiutiu, V. (2008). In situ 2-D piezoelectric wafer active sensors arrays for guided wave damage detection. *Ultrasonics*, 48(2), 117-134.
- [24] Zhao, X., Yuan, S., Yu, Z., Ye, W., & Cao, J. (2008). Designing strategy for multi-agent system based large structural health monitoring. *Expert Systems with Applications*, 34(2), 1154-1168.
- [25] Gunther, M. F., Wang, A., Fogg, B. R., Starr, S. E., Murphy, K. A., & Claus, R. O. (1993). Fiber optic impact detection and location system embedded in a composite material. In *Fibers' 92*. International Society for Optics and Photonics. 262-269.
- [26] Park, J. (2005). *Impact identification in structures using a sensor network: The system identification approach*. Dissertation, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University.
- [27] Markmiller, J. (2007). *Quantification and optimization of a structural health monitoring system for impact detection in composite structures*. Dissertation, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University.