

# Alüminyum 2024 T-3 plakadaki hasar boyutunun lamb dalgası ile tespiti Determination of damage length in aluminum 2024 T-3 plate by lamb wave

Muhammet ÜNAL<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.  
munal@marmara.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 21.04.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 01.02.2017

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.86836

Araştırma Makalesi/Research Article

## Öz

Bu çalışmada, hasar tespiti ve yapısal durum izleme için Alüminyum 2024 T-3 plakası üzerinde oluşturulan 2 ile 5 cm arası kesikler Lamb dalgaları ile incelenmiş ve Lamb dalgalarının simetrik ve asimetric modlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Toplanan yüzey frekans cevaplarının zarfları Hilbert dönüşümü ile elde edilmiş ve her bir hasarın zayıflama miktarı yüzdelik olarak gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, her iki Lamb dalga modunun Alüminyum 2024 T-3 plakada oluşturulan kesik boyutlarının araştırılmasında kullanılabileceğini göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Lamb dalgası, Hilbert dönüşümü, Yapısal durum izleme

## Abstract

In this study, cuts between 2 and 5 cm formed on Aluminum 2024 T-3 plate for damage detection and structural health monitoring were examined with Lamb waves and the symmetric and asymmetric modes of Lamb waves were compared. The envelopes of the acquired surface frequency responses are obtained by Hilbert transform and the amount of attenuation of each damage is shown as a percentage. The results show that both Lamb wave modes can be used to investigate the cut dimensions created in the Aluminum 2024 T-3 plate.

**Keywords:** Lamb wave, Hilbert transform, Structural health monitoring

## 1 Giriş

Yapısal durum izleme çalışmalarında gelişen teknoloji ile birlikte, tahribatsız yöntemler kullanılarak hızlı sonuçlar alınabilmekte ve arızalar hakkında detaylı bilgi elde edilebilmektedir. Bu sebeple uçak ve uzay araçlarında bu yöntemler son zamanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Uçakların ve uzay araçlarının gövdelerinde metalik ve kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanılan bu malzemelerde yırtılma, aşınma ve araçların maruz kaldıkları yüklerden dolayı farklı hasarlar meydana gelmektedir. Bu tarz araçlarda oluşan küçük problemler büyük maliyetli sonuçlara sebep olduğu için araştırmacılar sürekli olarak performansı geliştirmeye yönelik özellikle arızanın yerini bulmak ve büyüklüğünü ölçmeye yönelik çalışmaktadır. Metalik malzemelerde çatlak, vuruş, korozyon ve yorulma şeklinde meydana gelen bu arızalar bazen gözle görülemeyecek yerlerde ve seviyelerde olmaktadır. Arızaların tespiti için doğrudan ve dolaylı olmak üzere farklı ölçüm teknikleri kullanılmaktadır. Görüntüleme ile yapılan mevcut arıza teşhis tekniklerinde ölçüm yapılacak malzemeler çıkarılıp testlere tabi tutulmakta, büyük makineler ile x-ray veya ultrasonik testler yapılmaktadır [1]. Elde edilen görüntülerin yorumlanıp arıza hakkında bilgi çıkartmak için uzman kişilere ihtiyaç duyulması ve görüntüleme cihazlarının yüksek maliyetli olması bu sistemlerin dezavantajlarındandır.

Bu yöntemlerin yanında titreşim [2], akustik emisyon [3],[4] ve ses sinyalleri [5] ile yüzey akustik dalgalarının kullanıldığı teknikler de vardır. Yüzey akustik dalgaları piezoelektrik algılayıcılar ile metalik yüzeylerde düşük maliyetle oluşturulabilmekte ve uzun mesafelerde ölçüm yapılabilmektedir. Bu özellikleri sebebiyle yüzey akustik dalgaları yapısal durum izleme tekniklerinde popüler hale gelmektedir [6]-[11]. Yüzey dalgalarının kullanıldığı çeşitli yapısal durum izleme çalışmaları literatürde bulunmaktadır. Fekrmandi ve diğ. çok kaynaklı robot kolu üzerine

yerleştirdikleri piezoelektrik malzeme ile robot kolun vidalarının hangisinde gevşeklik olduğunu göstermişlerdir [12]. Tansel ve diğ. makine parçalarının durumunun online olarak gözlemlenmesini ve arıza durumlarının tespit edilmesini yüzey dalgaları ile gerçekleştirmişlerdir [13]. Senyurek'in uçak kanadında yaptığı çalışmada ise kanadın üzerindeki ezilmelerin ve çatlakların yerinin tespiti için Lamb dalgalarını kullanılmış ve sinyal alıcı-verici arasında oluşan zaman farkı ile yapısal durum izleme gerçekleştirilmiştir [14]. Giurgiutiu ve diğ. farklı sayıda piezoelektrik malzeme kullanarak Lamb dalgalarındaki gecikmelerin miktarında oluşan farklarla çatlağın yerinin analitik düzlemde gösterilmesini gerçekleştirmişlerdir [15],[16].

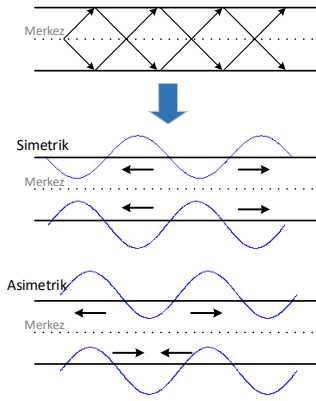
Piezoelektrik algılayıcıya uygulanan elektrik sinyalleri metal plaka yüzeyinde Lamb dalgalarına dönüştürüldükten sonra yapısal durum izleme için elde edilen sinyallerin görselleştirilmesi önemli bir işlemdir. Bu amaçla yapılan çalışmalarda dalgacık dönüşümü [17], Hilbert dönüşümü [18] ve tekil değer ayrışımı [19] gibi çeşitli sinyal işleme teknikleri kullanılmaktadır. Hilbert dönüşümü ile sinyalin enerjisi veya zarfı elde edilebilmekte [8],[20] ve hasarın tespitinde sinyalin zarfında uçuş süresi (time of flight) hesaplanabilmektedir [21]. Hilbert dönüşümü aynı zamanda çentik tipi arızaların teşhisi ve yerini tespitine de kullanılmaktadır [22]-[24].

Bu çalışmada, alüminyum plakada piezoelektrik algılayıcı ile üretilen Lamb dalgası ile plaka üzerinde oluşturulan 4 farklı seviyedeki kesiklerin boylarının tespiti için Lamb dalgalarındaki değişim incelenmiştir. Bu amaçla farklı Lamb dalga modlarının baskın olmasını sağlayacak iki farklı yüzey yayılım frekansı ile çalışılmış ve uygun olan frekans tespit edilmiştir. Elde edilen Lamb dalgalarının zarfları Hilbert dönüşümü ile gösterilmiş ve her bir kesikte elde edilen sinyallerin zayıflama değerleri kesik olmayan duruma göre karşılaştırılmıştır. Alüminyum plakada oluşturulan kesiklerin boyunu tespitinde hangi Lamb dalga Modunun daha iyi sonuçlar verdiği ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

## 2 Metot

### 2.1 Lamb dalgası

İnce bir yüzeye mekanik kuvvet uygulandığında yüzeyde esnek dalgalar üretilir ve malzeme yüzeyinde oluşan bu dalgalar her yöne doğru yayılır. Her iki yüzeyde de yayılan kılavuzlanmış akustik dalgalara Lamb dalgası denir ve ilk olarak Horace Lamb tarafından 1917 yılında tanıtılmıştır [25]. Lamb dalgaları, simetrik (S0, S1, S2,...) ve asimetrik (A0, A1, A2,...) modlar olmak üzere ikiye ayrılır ve her iki modda yüzeyde yayılırlar. Simetrik Lamb dalgaları plakanın her iki yüzeyinde plakanın merkezine simetrik biçimde hareket ederler ve bu modda en verimli dalga hareketi yüzeye paralel uyarım yapıldığında üretilir. Asimetrik modda ise Lamb dalgası yüzey boyunca aynı yönde hareket eder. Şekil 1'de Lamb dalgalarının simetrik ve asimetrik modda yayılma şekilleri gösterilmektedir.



Şekil 1: Lamb dalgasının simetrik ve asimetrik modda yayılması.

Lamb dalgalarının davranışı uygulandığı malzemenin kalınlığı, kullanılan piezoelektrik algılayıcının ölçüleri, uygulanan sinyalin frekansı ve yüzeye olan açısına bağlı olarak değişmektedir. Simetrik ve asimetrik modların dalga denklemleri denklem 1 ve 2'de sırasıyla verilmiştir.

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = \frac{k^2 qp}{(k^2 - q^2)^2} \quad (1)$$

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = \frac{(k^2 - q^2)^2}{4k^2 qp} \quad (2)$$

$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2, \quad q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2, \quad k = \frac{\omega}{c_p}$$

Burada,  $h$  plaka kalınlığı,  $k$  dalga sayısı,  $c_L$  boyuna dalga hızı,  $c_T$  enine dalga hızı,  $c_p$  faz hızı ve  $\omega$  açısal hızdır. Bu çalışmada deneyler uçak ve uzay araçlarının imalatında kullanılan alüminyum 2024-T3 plaka üzerinde yapılmıştır ve malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir [26].

Tablo 1: Alüminyum 2024-T3 plakasının özellikleri.

| Özkütle<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Boyuna Hız<br>(m/s)     | Enine Hız<br>(m/s)      |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 2.78 x 10 <sup>3</sup>          | 6.211 x 10 <sup>3</sup> | 3.129 x 10 <sup>3</sup> |

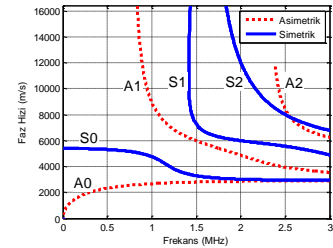
Lamb dalgası farklı malzemelerde ve uyarım frekanslarında değişik hızlarla yayılmaktadır. Tek frekansın hızı, malzemenin kalınlığı ile ilişkilidir ve bu hızla faz hızı denmektedir. Ayrıca, çok sayıda frekansta oluşan dalga paketi yayılma hızı ise grup

hızı ( $c_g$ ) olarak adlandırılır Eşitlik 3'te grup hızı denklemleri verilmektedir. Faz ve grup hızı arasındaki fark yayılım boyunca dalga paketinin bozulmasına sebep olacaktır için elde edilen sinyalin yorumlanmasını kolaylaştırmak adına uygun uyarım frekansının bulunması gerekmektedir [27].

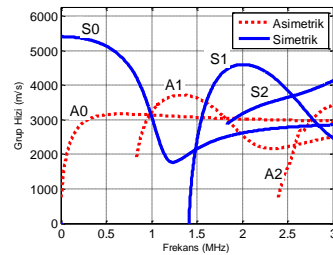
$$c_g = \frac{d(kc_p)}{dk} = c_p + k \frac{dc_p}{dk} \quad (3)$$

Tablo 1'de verilen değerler kullanılarak teorik hesaplama ile elde edilen simetrik ve asimetrik dalga modlarının grup ve açısal hızları Şekil 2'de gösterilmektedir.

Piezoelektrik algılayıcılar ile Lamb dalgaları üretilirken simetrik ve asimetrik dalgalar aynı anda yüzeyde yayılarak birbiri içine geçebilirler ve gönderilen uyarım sinyalinin şekli değişebilir. Bu şekil değişikliği de simetrik ve asimetrik modların ayrıştırılmasını zorlaştırmaktadır. Bu problem ortadan kaldırmak için bir modun düşük genlikli diğer modun ise yüksek genlikli olduğu frekans değeri uyarım frekansı olarak seçilir. Şekil 2 incelendiğinde 500 kHz altında sadece A0 ve S0 Lamb dalga modları bulunmaktadır ve 500 kHz altında Alüminyum 2024-T3'e ait Lamb dalgalarının simetrik (S<sub>0</sub>) ve asimetrik (A<sub>0</sub>) modda normalize edilmiş gerilim değerleri Şekil 3'te gösterilmektedir. Asimetrik modun genliğinin simetrik moda göre minimum olduğu yayılma frekansı teorik olarak 50, 170, 325 ve 490 kHz uyarım frekansı olduğu Şekil 3'ten anlaşılmaktadır. Simetrik modun genliğinin asimetrik moda göre minimum olduğu frekanslar ise sırasıyla 15 ve 285 kHz olarak tespit edilmiştir.

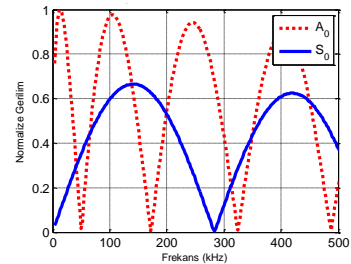


(a): Grup hızı.



(b): Faz hızı.

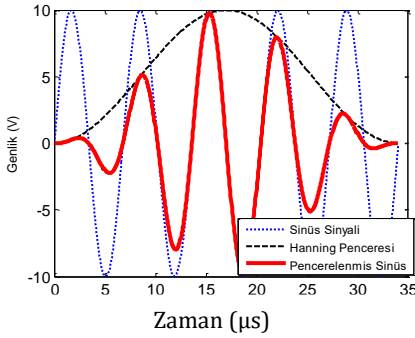
Şekil 2: Alüminyum 2024-T3 plakası için dağılım eğrileri.



Şekil 3: Alüminyum 2024-T3 plakasında temel Lamb dalga modlarının normalize edilmiş genlikleri.

Yapılan teorik hesaplamalar neticesinde simetrik mod için 170 kHz olarak seçilmesi gerektiği görülmüş ve deneme yanılma ile elde edilen test sonuçlarında ise 147 kHz'in simetrik mod (S0) için en uygun uyartım frekansı olduğu görülmüştür. Aynı şekilde asimetrik mod için 15 kHz uyartım frekansının uygun olduğu teorik olarak bulunmuş ama alüminyum plaka üzerinde yapılan denemeler neticesinde ise 24 kHz'in asimetrik mod (A0) için en uygun frekans olarak tespit edilmiştir.

Uyartım sinyali olarak 5 tane sinüs sinyalinden oluşan ve Hanning pencereleme metodu ile pencerelenen sinyal uyartım dalga paketi olarak kullanılmıştır. Bu sinyal, periyodu 100 ms olan ton sinyali (tone burst) halinde alüminyum plakaya uygulanmıştır. Şekil 4'te alüminyum plakaya uygulanan uyartım sinyalinin zaman düzleminde genlik değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4: Alüminyum plakaya uygulanan uyartım dalga paketi.

## 2.2 Analitik sinyal ve Hilbert dönüşümü

Hilbert dönüşümü gerçek bir sinyalin genliğini değiştirmeden sadece fazını doksan derece kaydıran ve gerçek bir sinyalden analitik bir sinyal elde etmek için kullanılan matematiksel bir dönüşümdür. Analitik sinyal  $x_a(t)$ , zaman fonksiyonu olan gerçek sinyalin  $x(t)$  kompleks fonksiyonu ile birlikte gösterimidir ve gerçek sinyalin zarfını elde etmek için çok kullanışlıdır.

$$x_a(t) = x(t) + iH\{x(t)\} \quad (4)$$

Burada,  $H\{x(t)\}$ , Hilbert dönüşümüdür. Analitik sinyal polar formda şu şekilde gösterilebilir:

$$x_a(t) = r e^{-i\theta} \quad (5)$$

Burada,  $r$  ve  $\theta$  sırasıyla analitik sinyalin mutlak değeri ve fazıdır. Analitik değerinin mutlak değeri sinyalin zarfını vermektedir.  $x(t)$  sinyalinin Hilbert dönüşümü Denklem 6'da tanımlanmıştır.

$$H\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (6)$$

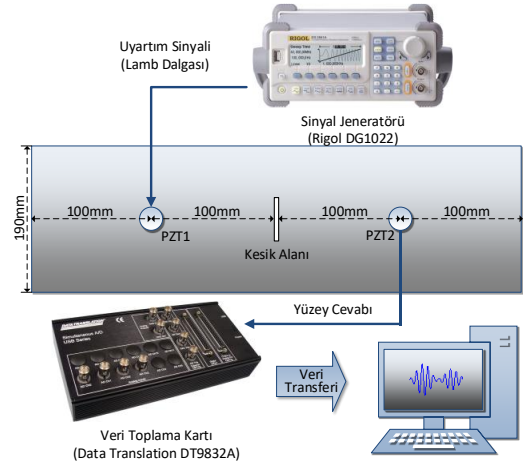
Hilbert dönüşümü konvolüsyon teoremi kullanılarak Denklem 7'de gösterildiği gibi yazılabilir [14].

$$H\{x(t)\} = x(t) * \frac{1}{\pi t} \quad (7)$$

## 3 Deney düzeneği ve ölçüm sistemi

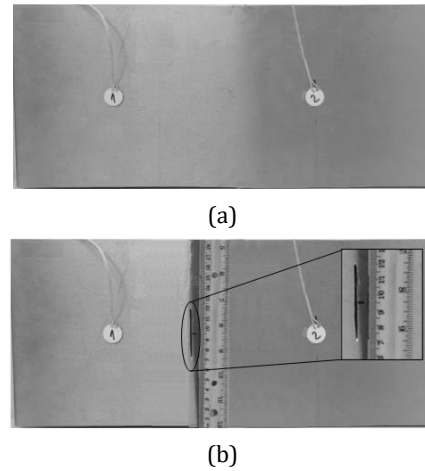
Alüminyum plaka üzerinde oluşan kesiklerin boyutunun tespit edilmesi için yapılan bu çalışmada 190 x 400 x 2 mm boyutunda Al 2024-T3 plaka kullanılmıştır. Lamb dalgasının üretilmesi ve yüzey dalga cevabının elde edilmesi için 19 mm çapında 1 mm kalınlığında iki adet piezoelektrik algılayıcı alüminyum

plakanın yüzeyine epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Deney düzeneğinin şematik diyagramı Şekil 5'te gösterilmektedir. Lamb dalgası uyartım sinyalinin üretilmesi için Rigol marka DG1022 serisi sinyal jeneratörü ve yüzey dalgalarının sayısal ortama aktarılması için Data Translation DT9832A veri toplama kartı kullanılmıştır.



Şekil 5: Deney düzeneği şematik diyagramı.

Bu çalışmada alüminyum plaka üzerinde sırasıyla 2, 3, 4 ve 5 cm boyutunda kesikler oluşturulmuş ve her seferinde aynı uyartım sinyali gönderilerek plakanın yüzey cevabı kaydedilmiştir. Şekil 6'da alüminyum plakanın ilk hali ve 5 cm kesiklinin bulunduğu son plaka gösterilmektedir.



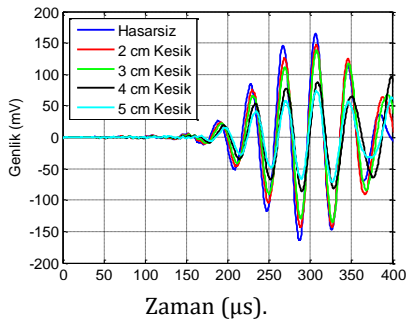
Şekil 6: Test plakasının kesikten önce ve sonraki resimleri.

## 4 Deneysel bulgular

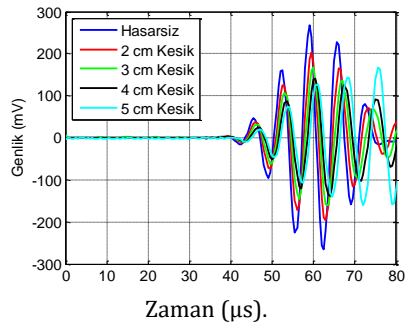
Alüminyum plakanın ortasında oluşturulan kesiklerin boyutunun Lamb dalgaları kullanılarak tespit edilmesi için yapılan bu çalışmada, uyartım frekansı sırasıyla A0 için 24 kHz ve S0 için 147 kHz olarak seçilmiş ve baskın modun her seferinde bir mod olduğu deneyler yapılmıştır. Uygulanan sinyallerin tepeden tepeye genliği 20V olarak ayarlanmıştır. Dalga hızları uygulamada A0 ve S0 için sırasıyla 5000 m/s ve 1428 m/s olarak ölçülmüştür.

Lamb dalgası uygulamalarında yüzey cevabını elde etmek için darbe-yanıt (Pulse-Echo) ve gönder-al (Pitch-Catch) olmak üzere iki farklı yöntem vardır. Darbe-yanıt yönteminde uyartım ve yüzey cevabını dinleme için aynı piezoelektrik algılayıcı kullanılır. Gönder-al metodunda ise en az birer tane uyartım ve

dinleme için piezoelektrik algılayıcı kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise darbe-yanıt metodu kullanılmaktadır. Uyarım başladıktan sonra piezoelektrik algılayıcı ile her yöne dalgalar yayılmakta ve yayılan dalgalar plakanın kenarlarına çarparak geri yansımaktadır. Plaka üzerindeki kesik hakkında bilgi elde etmek için toplanan sinyal değerlendirilirken ilk gelen dalga paketi ele alınmakta sonra gelen dalgalar her yönden gelen yansımalarla birlikte iç içe geçtiği için anlaşılması zor olmakta ve bu sebeple değerlendirilmemektedir. Uyarım noktası ile alıcı noktası arası 200 mm olduğu için 147 kHz frekansta bu mesafeyi 40 µs' de almaktadır. Uyarım frekansı 24 kHz seçildiği zaman ise bu süre 150 µs olmaktadır. Bu sürelerden sonra gelen dalgalar kenarlardan yansıyanlar olduğu için değerlendirilmeye alınmamaktadır. Elde edilen Lamb dalgası cevapları Şekil 7'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

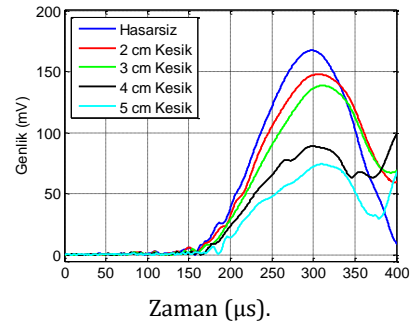
Şekil 7: Darbe-yanıt metodu ile elde edilen Lamb dalgası cevapları. (a): Asimetrik mod, (b): Simetrik mod.

Alüminyum plaka üzerinde yapılan kesiklerden sonra elde edilen sinyalleri sayısal olarak değerlendirmek ve karşılaştırmak için Hilbert dönüşümü ile zarfları elde edilmiştir. Hasarsız durum ve kesiklerden sonra elde edilen sinyallerin zarfları Şekil 8'de gösterilmektedir. Hasarsız durumda elde edilen zarf değeri maksimum genlikle elde edilmiş ve kesik boyutu arttıkça sinyallerin zarflarının tepe değerleri azalmaya başlamıştır. 24 kHz uyarım sinyali uygulandığında özellikle 3 cm'lik kesikten sonra 4 ve 5 cm'lik kesiklerin sinyali daha da zayıflattığı görülmektedir. Uyarım sinyali olarak 147 kHz uygulandığında ise ilk kesikle birlikte her bir kesikte benzer oranda düşüş olmuştur. Ancak 5 cm'lik kesikten sonra ilk gelen sinyalin sonlarına doğru diğer moddan bir dalga yayılmaya başladığı için sinyalin son kısımları bozulmaya başlamıştır. Bu sebeple 5 cm'den sonra çalışma durdurulmuştur.

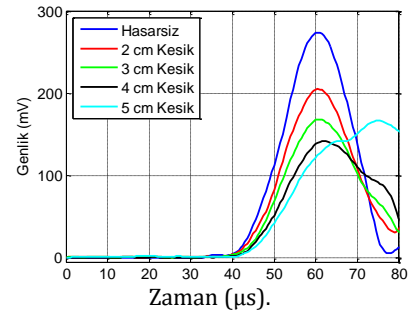
Elde edilen zarf sinyallerinin hasarsız durumda elde edilen sinyale göre olan benzerlikleri elde edilmek için karekök ortalama (RMS) değeri kullanılmıştır.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (8)$$

Burada,  $N$  toplam değer miktarı ve  $i$  de örnek sayısını göstermektedir. Her kesik için elde edilen RMS değerlerinin hasarsız duruma benzerliği yüzde olarak hesaplanmış ve Şekil 9'da gösterilmiştir. 24 kHz de uyarım sinyali verilince kesige duyarlılık artmaktadır ve hasarsız duruma nazaran değişim büyük farkla başlamaktadır ve benzer oranlarda devam etmektedir. 147 kHz uyarım sinyalinde ise ilk hata ile hasarsızlık arasında 24 kHz'e nazaran daha az değişim olmakta ve özellikle 3 cm'lik kesikten sonra fark artmaktadır.

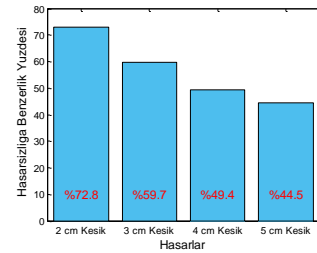


(a): Asimetrik mod.

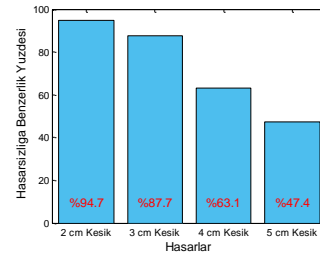


(b): Simetrik mod.

Şekil 8: Lamb dalgası cevaplarının zarfları.



(a): Asimetrik mod.



(b): Simetrik mod.

Şekil 9: Hasarlı durumlarda elde edilen sinyallerin hasarsızlığa benzerlik yüzdeleri.

## 5 Sonuç

Bu çalışmada alüminyum 2024 T-3 plaka üzerinde 4 farklı büyüklükte kesikler oluşturulmuş ve 24 ve 147 kHz olmak üzere iki farklı frekansta uyarım sinyali ile kesikler hakkında bilgi elde edilmiştir. Seçilen frekanslar Lamb dalgalarının iki farklı modu olan A0 ve S0'ın sırasıyla genliğinin baskın olacağı şekilde seçilmiştir. Her iki modda da kesikler ile hasarsız durum arasında farklar olduğu görülmüştür. Özellikle 24 kHz'de elde edilen sonuçlarda ilk kesikle birlikte hasarsız durumdakine nazaran büyük fark oluşmuştur bu durumda bu frekansın kesige daha duyarlı olduğunu göstermektedir.

Elde edilen değerler yapay zekâ içeren yazılımlarla veya istatistiksel metotlarla kullanılarak plakanın üzerindeki arızalar sınıflandırılabilir. Böylece farklı yüzeylere yerleştirilen piezoelektrik algılayıcı ile sürekli olarak yapısal durum izleme gerçekleştirilebilir. Yapılacak bu işlemler ile bakım maliyetleri azaltılıp hatalı alarm durumlarının sayısı azaltılabilir.

## 6 Teşekkür

Bu çalışma, Amerika Birleşik Devletleri Florida International University, Mecahtronics Laboratuvarında TÜBİTAK'ın vermiş olduğu destekle yapılmıştır. Laboratuvarda yapılan çalışmalar için sağlamış olduğu imkânlardan dolayı Dr. İbrahim Nur TANSEL'e ve yapıcı yorumlarıyla vermiş olduğu destekten dolayı Dr. Volkan Yusuf ŞENYÜREK'e çok minnettarım.

## 7 Kaynaklar

- [1] Dinakaran D, Sampathkumar S, Sivashanmugam N. "An experimental investigation on monitoring of crater wear in turning using ultrasonic technique". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(15), 1234-1237, 2009.
- [2] Alonso F, Salgado D. "Analysis of the structure of vibration signals for tool wear detection". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22(3), 735-748, 2008.
- [3] Lu P, Chou Y. "Analysis of acoustic emission signal evolution for monitoring diamond-coated tool delamination wear in machining". *Machining and Machine-tools: Research and Development*, 1, 2013.
- [4] Sun J, Wong Y S, Hong G S, Rahman M. "Feature analysis in tool condition monitoring: a case study in titanium machining". *International Journal of Computer Applications in Technology*, 45(2-3), 177-185, 2012.
- [5] Salgado D, Alonso F. "An approach based on current and sound signals for in-process tool wear monitoring". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(14), 2140-2152, 2007.
- [6] Fekrmandi H, Rojas J, Tansel I N, Yapici A, Uracun B. "Investigation of the computational efficiency and validity of the surface response to excitation method". *Measurement*, 62, 33-40, 2015.
- [7] Yu L, Giurgiutiu V. "Multi-mode damage detection methods with piezoelectric wafer active sensors". *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20(11), 1329-1341, 2009.
- [8] Ostachowicz W, Kudela P, Malinowski P, Wandowski T. "Damage localisation in plate-like structures based on PZT sensors". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(6), 1805-1829, 2009.
- [9] Chakraborty D, Kovvali N, Wei J, Papandreou-Suppappola A, Cochran D, Chattopadhyay A. "Damage classification structural health monitoring in bolted structures using time-frequency techniques". *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009.
- [10] Santoni G B, Yu L, Xu B, Giurgiutiu V. "Lamb wave-mode tuning of piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring". *Journal of Vibration and Acoustics*, 129(6), 752-762, 2007.
- [11] Giurgiutiu V. "Tuned Lamb wave excitation and detection with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring". *Journal of intelligent material systems and structures*, 16(4), 291-305, 2005.
- [12] Fekrmandi H, Rojas J, Campbell J, Tansel I N, Kaya B, Taskin S. "Inspection of the integrity of a multi-bolt robotic arm using a scanning laser vibrometer and implementing the surface response to excitation method (SuRE)". *International Journal of Prognostics and Health Management*, 5(1), 1-10, 2014.
- [13] Tansel I N, Singh G, Singh G, Korla S, Grisso B L, Salvino L W, Uracun B. "Monitoring the integrity of machine assemblies by using surface response to excitation (SuRE) approach". *5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST 2011)*, Istanbul, Turkey, 9-11 June 2011.
- [14] Senyurek VY. "Detection of cuts and impact damage at the aircraft wing slat by using Lamb wave method". *Measurement*, 67, 10-23, 2015.
- [15] Giurgiutiu V, Bao J, Zagrai AN. "Structural health monitoring system utilizing guided Lamb waves embedded ultrasonic structural radar". ed: Google Patents, 2006.
- [16] Yu L, Giurgiutiu V. "In situ 2-D piezoelectric wafer active sensors arrays for guided wave damage detection". *Ultrasonics*, 48(2), 117-134, 2008.
- [17] Chen X, Li B. "Acoustic emission method for tool condition monitoring based on wavelet analysis". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(9-10), 968-976, 2007.
- [18] Unal M, Onat M, Demetgul M, Kucuk H. "Fault diagnosis of rolling bearings using a genetic algorithm optimized neural network". *Measurement*, 58, 187-196, 2014.
- [19] Gu S, Ni J, Yuan J. "Non-stationary signal analysis and transient machining process condition monitoring". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(1), 41-51, 2002.
- [20] Gangadharan R, Mahapatra DR, Gopalakrishnan S, Murthy C, Bhat M. "On the sensitivity of elastic waves due to structural damages: Time-frequency based indexing method". *Journal of sound and vibration*, 320(4), 915-941, 2009.
- [21] Quek ST, Tua P, Wang Q. "Detecting anomalies in beams and plate based on the Hilbert-Huang transform of real signals". *Smart materials and structures*, 12(3), 447, 2003.
- [22] Imano K, Endo T. "Experimental study on the mode conversion of lamb wave using a metal plate having a notch type defect". *International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources*, 19(1-2), 20-23, 2013.
- [23] Agarwal S, Mitra M. "Lamb wave based automatic damage detection using matching pursuit and machine learning". *Smart Materials and Structures*, 23(8), 085012, 2014.

- [24] Chen X, Michaels JE, Lee SJ, Michaels TE. "Load-differential imaging for detection and localization of fatigue cracks using Lamb waves". *NDT & E International*, 51, 142-149, 2012.
- [25] Lamb H. "On waves in an elastic plate". *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 114-128, 1917.
- [26] Su Z, Ye L, Lu Y. "Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review". *Journal of sound and vibration*, 295(3), 753-780, 2006.
- [27] Kim YH, Kim DH, Han JH, Kim CG. "Damage assessment in layered composites using spectral analysis and Lamb wave". *Composites Part B: Engineering*, 38(7-8), 800-809, 2007.