

# Lamb Dalga Testi ile Uçaklarda Yapısal Sağlık İzleme





Lamb Dalga Testi ile Uçaklarda Yapısal Sağlık İzleme Lazer Vibrometre ile Hasar Tespiti Uygulama Notu



# Komponentlerdeki yapısal hasar, genelde

dışarıdan görülemez. Ancak ultrasonik dalgalar yapısal sağlık izleme için kullanılabilmektedir. Dalgaların yayılımı ve bu esnada hasarlı bölgelerdeki davranışı, tüm yüzey üzerinden tarayıcı tip lazer vibrometre ile temassız şekilde ölçülüp görüntülenebilir.



# Ultrasonik yüzey dalgaları kullanarak lazer vibrometre tarayıcı ile yapısal sağlık izleme sistemi

Bu makale kısaca, Lamb dalgaları olarak adlandırılan ultrasonik dalgaların ve 3D tarama lazer vibrometrisinin ilkelerini açıklamaktadır.

Makale, hem dalgaların yayılımını hem de dalgaların hasarlı noktalarla etkileşimlerini kullanarak elde edilen ölçüm sonuçlarını gösterir.

### Hasar tespiti için Lamb dalgaları

Güvenlik açısından kritik bileşenlerdeki kusurların tespiti için standart yöntem, ultrasonik sensörler kullanılarak plakaların/panellerin taranmasıdır. Bununla birlikte, bu yöntem genellikle "arka duvar eko yöntemi" olarak adlandırılan verici veya alıcıdan birinin panelin zıt tarafında olmasını ya da ikisinin de aynı tarafta su kullanılarak panele bağlantısını gerektirir ki bu son derece sınırlı bir yöntemdir. Diğer alternatif yöntem ise, ultrasonik dalgaların panelde yayılımını ve bunların kusurlu noktalarla etkileşimlerini gözlemlemektir. İnce duvarlı yük taşıyan bileşenlerde – geçmişte neredeyse tamamen metal levhadan yapılan, ancak bugün giderek artan şekilde güçlendirilmiş karbon fiber takviyeli plastik panellerden (CFRP) yapılan– dalgalar, levha içinde eğilme dalgaları ve sıkıştırma dalgaları olarak yayılır.





1

Yapısal bir kusurda simetrikten asimetrik Lamb dalgalarına mod dönüşümü 2 Alüminyum levhada 250 mm'nin üzerinde eğilme ve sıkıştırma dalgaları, gerçek sac kalınlığı 1 mm, gerçek titreşim genlikleri 100 nm'den az



Şekil 2, alüminyumdaki bükülme ve sıkıştırma dalgaları gruplarının bir kesitini göstermektedir (gerçek ölçülen veriler). İster ulaşılmaz bir yüzeyde, ister malzemenin ortasında bir malzeme kusuru veya yapısal bir hasar olsun, erişilebilir yüzden izlenebilen bir dalga hasarla etkileşir ve hasar dalganın davranışını değiştirir. Sahada (örneğin, uçuş sırasında panellerde) fiili kullanım sırasında hasarları izlemenin bir yolu, piezo tabanlı sensör-aktüatör ağlarının kurulmasıdır. Sensör sinyalleri, bileşenin durumunu anlamak için kullanılabilir. Noktasal ölçülen bu sinyalleri doğru bir şekilde değerlendirmek için, araştırma ve geliştirme aşamasında dalgaların davranışı uzay ve zaman içinde sürekli olarak gözlemlenmelidir - karmaşık fiziksel süreçler hakkında fikir edinmenin tek yolu budur. Bu işlem, lazer vibrometre tarayıcı kullanılarak kolay ve etkili bir şekilde gerçekleştirilebilir.

Ayrıca, onlarca yükseklikteki nanometre aralığındaki mevcut titreşim genlikleri ve yüz kilohertz'e kadar olan uyarma frekansları kolayca elde edilebilir. Lazer tarayıcı vibrometresi de bu tür piezo-sensör ağlarının yerleşimi için oldukça uygundur. Ayrıca, geleneksel ultrasonik sensörlü yöntemlerin pratik olmadığı durumlarda hata tespiti için rahatlıkla kullanılabilir.

### 3D Tarayıcı Lazer Vibrometresi

3D Tarayıcı Vibrometresi, mekanik yapılardaki 3D titreşimleri temassız ve dış etkilere duyarsız şekilde ölçmemizi sağlar.

Yöntem, hareketli yüzeylerden saçılan ışık dalgalarının frekansta bir değişikliğe uğramasına neden olan ve değişimin harekete bağlı olduğu optik Doppler etkisine dayanmaktadır. Frekans değişimi, titreşim hızının anlık değeri ile doğru orantılıdır ve 10<sup>-8</sup> den küçük olan oldukça küçük bağıl değerine rağmen, interferometrik yöntemler kullanılarak kesin olarak belirlenebilir. Bu amaçla vibrometre içinde geri saçılan lazer ışığı, frekansı belirli bir miktarda kaydırılmış bir referans ışını ile karşılaştırılır.(heterodin süreci, bkz. şekil 3).

Doppler frekans kayması üzerinde sadece huzme yönündeki hız bileşeninin bir etkisi vardır. Bu nedenle, ölçüm noktasındaki hız vektörünü tamamen ölçmek için bir 3D Tarayıcı Vibrometre (şekil 4) kullanılır.

**3** Lazer vibrometrenin optik dizaynı



3D tarayıcı lazer vibrometresi tüm yüzeyde hem düzlem içi hem düzlem dışı haraketleri ölçebilir

4





Her bir ölçüm noktasının hareketini tam olarak ölçmek için üç bağımsız, farklı yönlendirilmiş lazer ışını kullanır. Standart FFT titreşim analiz moduna ek olarak, dalga izleme için zaman modunda ölçüm yapmak da mümkündür. Deneysel tekrarlanabilirlik sağlanabilirse, tarama ızgarasının her noktası için dalgaları uyarmak için aktüatöre özdeş bir sinyal uygulanır ve her nokta için tekrarlanır. Her bir ölçümün birbiriyle doğru bir şekilde senkronize edilmesi için, ölçümün başlangıcı ile uyarım arasındaki zaman aralığı her seferinde aynı şekilde tetiklenmeli ve hiçbir transfer fonksiyonuna neden olmamalıdır. Bu durumda bir referans sinyalinin yakalanması ve saklanması kesinlikle gerekli değildir. Lazer vibrometrede alan, tarama ızgarası(grid) tarafından bölümlere ayrılırken, zaman sinyali yarısürekli olarak kaydedilir. Bu nedenle, bu yöntem, örneğin, alanın gözlemlenen yüzey üzerinde yarı-sürekli olarak ölçüldüğü, ancak zamanın ayrı adımlarla ölçüldüğü holografi (holograph) ve ESPI'den (elektronik benek deseni interferometrisi - electronic speckle pattern interferometry) temelde farklıdır. Otomatik tarama yoluyla, zaman ve konum açısından veri kaydının tam olarak yakalanmasına izin vermek için tek bir kurulum süreci yeterlidir.

**5** Saptırılan lazer ışınının geometrik koşulları ve bir tarama noktasının hız vektörü (sol: tek boyutlu titreşim, sağ: çok boyutlu titreşim)



V<sub>zDisplay</sub>

### 1D Tarama Lazer Vibrometresi: Eğik Titreşimlerin Gözlenmesi

1D tarama sistemleri, yönü değişmemiş lazer (genellikle z ekseni) yönünde tek boyutlu titreşimler ölçer. Bu durumda, bir tarama noktasının hız vektörü yalnızca v<sub>z</sub> = v bileşenine sahiptir (bakınız şekil 5, sol).

Vibrometreler temel olarak lazer ekseni yönünde hız bileşenini ölçer, böylece v<sub>Meas1D</sub> ölçülen değişkeni, v<sub>z</sub> titreşim hızını elde etmek için sapma açısının  $\alpha$ kosinüsüne bölünmelidir:

$$v_z = \frac{v_{Meas1D}}{\cos \alpha}$$

Lamb dalgalarında olduğu gibi titreşimler artık z yönünde tek boyutlu değilse, Polytec Scanning Vibrometer yazılımının açı düzeltme özelliği ile bu telafi edilemez.Tarama noktasının hız vektörü v, z ekseninden α açısı kadar yansır. Vibrometre tarafından algılanan titreşim ayrıca lazer eksenine paralel bileşendir, yani v<sub>Meas.</sub>

Şekil 5 sağ geometrik ilişkileri gösterir:

$$v_{Meas} = v \cos{(\beta - \alpha)}$$

eşitliğinden

$$V_{zDisplay} = \frac{V_{Meas}}{COS \alpha}$$

PSV yazılımının açı düzeltme özelliği lazerin sapma açısını düzeltir. v'nin Kartezyen ayrışmasına göre, z bileşeni

$$V_z = V \cos \beta$$

Buna göre hata faktörü ;

$$\frac{V_{zDisplay}}{V} = \frac{V \cos{(\beta - \alpha)}}{V \cos{\alpha} + V \cos{\beta}} = \tan{\alpha} \tan{\beta} + 1$$

Bu nedenle, tam bir z-titreşim meydana gelirse ( $\beta = 0$ ) yani lazer ışını yüzeye tam olarak dik ise ( $\alpha = 0$ ) burada hata oluşmayacaktır. Açılardan en az biri 90°'ye yaklaşırsa, hata sonsuz olur.PSV sistemlerinde lazer, iki uzamsal eksenin her biri etrafında 20° döndürülebilir, böylece maksimum açı  $\alpha = \tan -1$  ( $\sqrt{2}$ tan 20°) = 27,24° sonuçlanır.

Şekil 6'da, bahsedilen hata faktörü, çeşitli  $\beta$  (0°, 22,5°, 45°, 67,5°, 80°, 89°) değerleri için geçerli  $\alpha$  aralığı için mavi ile işaretlenmiştir.

Ek olarak kırmızı ile gösterilen hata faktörüdür

$$\frac{V_{\text{Meas}}}{V_{z}} = \frac{\cos{(\beta - \alpha)}}{\cos{\beta}}$$

bu, veri toplama yazılımında açı düzeltmesinin devre dışı bırakılması durumunda oluşmaktadır. Yalnızca β = 0° için bu, < 1 hata faktörü ile sonuçlanır, aksi takdirde hata açı düzeltmenin etkinleştirildiği durumdan biraz daha küçüktür. Bununla birlikte, verilerin nicel bir analizi geçersiz kalır.

Hata, simetrik Lamb dalgalarının düzlem dışı genliklerinin sinyal-gürültü oranını arttırdığı 1D vibrometrelerin kullanıldığı tamamen niteliksel araştırmalar üzerinde olumlu bir etkisi vardır. Yine de nicel çalışmalar bir 3D ölçüm sistemi gerektirir veya yalnızca lazer ışınının dik olarak yüzeye yönlendirildiği noktalarda gerçekleştirilebilir.

### Plakalarda Ultrasonik Dalgalar Lamb Dalgalarının Teorisi

Yukarıda bahsedildiği gibi, plakalardaki dalgalar bükülme ve sıkıştırma dalgaları olarak yayılır (düzlem içi kesme(shear) dalgaları burada dikkate alınmaz). 1917'de Horace Lamb<sup>1</sup>, Navier-Lamé diferansiyel denklemine analitik bir çözüm bulan ilk kişiydi.

 $(\boldsymbol{\lambda} + \boldsymbol{\mu}) \, \nabla \, (\nabla \cdot \vec{u}) + \boldsymbol{\mu} \nabla \cdot (\nabla \vec{u}) = \rho \vec{u}$ 

iki düzlemsel yüzeyle sınırlanmış homojen, izotropik, ideal olarak elastik bir süreklilik için - yani, örneğin bir metal levha veya plakadaki dalgalar için. Rayleigh-Lamb frekans denklemi olarak adlandırılan çözüm,

$$\frac{\tan pd}{\tan qd} = \left(\frac{(k^2 - q^2)^2}{4k^2pq}\right)^{\pm 1}$$
$$p = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2} \quad \text{ve } q = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2}$$

 $k = \frac{\omega}{c}$ 

(dairesel) dalga numarası ile

$$C_{L} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad Ve \qquad C_{T} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

bilinen Lamé sabitleridir (Young modülü ve Poisson oranından belirlenecektir) ve p malzemenin yoğunluğudur, dalgaların dağılım davranışı, yani dalgaların faz hızının c frekans bağımlılığı hakkında bilgi verir. ve bunların çok modlulukları göz önünde bulundurulmaktadır. Her uyarma frekansı için denklemin en az iki çözümü ve dolayısıyla en az iki dalga modu vardır. İlk iki çözüm temel modlar, S0 ve A0 olarak adlandırılır ve her f sırasıyla  $\omega > 0$  için oluşur. Aşağıdaki şekil 7'deki denklemin sayısal değerlendirmesinde kalın eğriler olarak gösterilmektedirler. Düz çizgiler, üs +1'e eşit olan denklemden hesaplanan simetrik Lamb dalgalarının (sıkıştırma dalgaları) faz hızlarını temsil eder, asimetrik modlar (bükülü dalgalar), üs -1'e eşit olarak hesaplanan kesikli çizgiler olarak gösterilir.

Bu tür dağılım diyagramlarını çizerken, (burada yapıldığı gibi) faz hızlarını plakanın frekans-kalınlık ürünü aracılığıyla uygulamak yaygındır, böylece bir diyagram herhangi bir plaka kalınlığı için geçerlidir.

Kuzu dalgaları teorisinin daha ayrıntılı açıklamaları Victor Giurgiutiu<sup>2</sup> tarafından Yapısal Sağlık İzleme bölümünde bulunabilir.



**6** Eğik titreşimlerin 1D taraması sırasında düzlem dışı genlikler için hata faktörü:  $β = 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ,$ 67.5°, 80°, 89° (artan meyil) yazılım üzerinde açı düzeltmesi aktif (mavi) ve açı düzeltmesi devre dışı bırakılmış (kırmızı)

### 7

Yukarıda: Bir alüminyum levhada simetrik (dış) ve antisimetrik (iç) Lamb dalgalarının yayılması.

Aşağıda: Bir alüminyum levhada kuzu dalgalarının dağılımı. (Dolu çizgiler: simetrik modlar, kesikli çizgiler: antisimetrik modlar, kalın: temel modlar. Mavi: Düzlem gerilimi varsayımına göre sıkıştırma dalgaları, Kırmızı: Kirchhoff teorisine göre eğilme dalgaları)

<sup>1</sup> Sir Horace Lamb, English mathematician and physicist, 29.11.1849 – 4.12.1934

Frequency \* plate thickness in MHz\*mm

500

elocity

hase

<sup>2</sup> Giurgiutiu, Victor: Structural Health Monitoring with piezoelectric wafer active sensors

### 8

Güçlü bir anizotropik karbon fiber takviyeli plastik panelde sıkıştırma dalgalarının yayılması



### 9

1D ölçümden büyük ölçüde büyütülmüş genliğe sahip simetrik (sıkıştırma) dalqa cepheleri



### 10

Bir anizotropik panelde sıkıştırma dalgalarının 1D (düzlem dışı (out of plane), üstte) ve 3D ölçülen datalar (üç yönde hareket bileşeni x, y ve z, altta)







Sürekli ortam mekaniğinin matematiğine dayanan Lamb dalgalarının tam tanımının yanı sıra, sıkıştırma ve bükülme dalgası özellikleri de basitleştirilmiş plaka teorilerinden türetilebilir. Düşük frekanslarda, bu şekilde elde edilen sonuçlar Lamb dalga teorisinden elde edilen sonuçlarla tutarlıdır. Ancak, daha yüksek frekanslarda, basitleştirmeler çok büyük hatalara yol açar. Düzlem gerilimi varsayımından dağılmayan plaka sıkıştırma dalga hızı (kırmızı eğri)

$$C_{L} = \sqrt{\frac{1}{1 - v^2} \frac{E}{\rho}}$$

S<sub>0</sub> faz hızı ve bükülme dalgası hızı (mavi eğri) Kirchhoff levha teorisi ile uyumluluk gösterir.

$$C_{F} = \sqrt[4]{\frac{D}{\rho h}\sqrt{\omega}} = \sqrt[4]{\frac{E}{12 \rho (1 - v^{2})}} \sqrt{\omega h}$$

A<sub>0</sub> faz hızına uyumluluk gösterir. Diyagram örtüşme ve sapma bölgelerini gösterir. Yukarıdaki Şekil 7, ortadaki bir piezoseramik aktüatör tarafından uygulanan bir uyarımından sonra bir alüminyum plakadaki Lamb dalgalarının (S<sub>0</sub> ve A<sub>0</sub> modları) 1D ölçümünden düzlem dışı yer değiştirme alanını göstermektedir.

### Kompozitte Ultrasonik Dalgalar Teorisi Fiber Paneller

Lamb dalgası teorisi yalnızca aşağıdaki sınırlamalarla uygulanabilir:

- ideal esneklik,
- homojenlik ve
- izotropi

Termoset (ısınınca sertleşen) gibi matris fiberplastik kompozitler (teknik olarak ilgili frekans aralığında) ideal esnekliğe iyi bir örnek olarak varsayılabilir. Daha büyük iç sönümlemeli malzemeler için bu basitleştirme kabul edilemez. Tanım olarak homojenlik, izotropi kadar fiber kompozitlere uygulanamaz. Elastikiyet parametrelerinin anizotropisi, dalga cephelerinin daireselden farklı derecelere kadar sapmalarına neden olur.

Sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal hesaplama yöntemleri ise dalgaların yayılım ve etkileşim davranışlarının öngörülmesinde hızla sınırlarına ulaşır.

Tekil olarak karbon fiberlerin gerçekçi şekilde modellemesi, kabul edilemez derecede yüksek maliyetlere neden olur, dolayısıyla modeldeki her basitleştirme, ikame kabul edilebilirliğinin deneysel olarak doğrulanmasını gerektirir. Bu nedenle, Lamb dalgalarının yayılmasını modellemek için ölçümler gereklidir. Şekil 8, güçlü bir anizotropik kompozit fiber panelde bir sıkıştırma dalgasının (S<sub>0</sub> Lamb dalgası) yayılımının tipik bir örneğini göstermektedir. Veri kaydı, bir 1D Tarayıcı Vibrometre kullanılarak yapılmıştır. Panel, ortasındaki bir piezoseramik aktüatöre uygulanan sinüzoidal bir yayma sinyali tarafından tahrik edilmiştir. Bu şekilde uyarılan iki temel dalga modunun faz hızlarındaki farktan dolayı dalga grupları birbirinden ayrılır ve ayrı ayrı gözlemlenebilir. Orta kısım aktüatöre yakın bölgedeki genlik artışı nedeniyle gömüktür.

### Dalga Gözlemi için 3D Tarama Vibrometresi

Lamb dalgaları için titreşim genlikleri milimetre ile santimetre aralığındaki dalga boylarında birkaç yüz nanometre gibi küçük değerlerdedir. Dalgaların kolayca görselleştirilebilmesi için genlikler büyük ölçüde büyütülmüş bir yükseklikle gösterilmiştir (şekil 9). Böyle bir uzamsal görselleştirme, 1B ölçülen veriler için sorun olmasa da uzamsal hareket ve önemli düzlem içi bileşenlerle, animasyondaki farklı titreşen noktaların hareket yörüngeleri birbiriyle örtüşebilir ve bu nedenle yanlış bir bozulma profili önerebilir.

Bu nedenle, 3D taramalardan elde edilen verilerin ya renk paleti kullanılarak ve büyük ölçüde geometrik animasyondan vazgeçilerek değerlendirilmesi ya da üç titreşim yönünü ayrı 1D temsiller olarak görselleştirilmesi tavsiye edilir. Şekil 10 yine Şekil 8'deki anizotropik plakada simetrik dalgaların yayılmasını göstermektedir, ancak bu sefer sonuçlar 1D (sol) ve 3D ölçümler (sağ) olarak birbiriyle zıt olarak gösterilmiştir. Görüntüler aynı deneyin aynı bölümünü gösterir. Bununla birlikte, 3D gösterim alanında, yazılım genel olarak belirgin bir işaret tahsis edemez, bu nedenle renk paleti sadece genliklerin işaretsiz katkıları ile oluşur. Üstte, yeşil ve kırmızı, negatif ve pozitif genlikleri temsil ederken, alttaki grafikte yeşil renk sabit, kırmızı, herhangi bir işaretin yüksek genliğini temsil eder. Sonuç olarak, aşağıdaki grafikte dalga boyu yarıya inmiş gibi görünür ve bu değerlendirmede dikkate alınmalıdır.

Aşağıda, tüm 1D gösterimler yeşil-siyah-kırmızı ile ve tüm çok boyutlu gösterimler yeşil-kırmızı ile gösterilmiştir.

(Düz) CFRP paneller üzerinde yapılan deneylerde, mevcut ölçümde yapıldığı gibi en iyi çözüm, ölçüm yüzeyini xy düzleminde tanımlamak ve yazılımın Kartezyen koordinat sisteminin x ve y eksenlerini, aşağıdaki panelin ana eksenleriyle hizalamaktır. Böylece basit bir şekilde düzlem içi ve düzlem dışı genlik bileşenleri görüntülenir.

Şekil 11, hareket bileşenlerine ayrılmış deneyi göstermektedir:

- Düzlem içi, x component
- Düzlem içi, y component
- Düzlem dışı, z component
- Düzlem içi,, x-y component

Sıkıştırma dalgalarının esas olarak plaka düzlem-içi titreşimler ürettiği ve bu bakımdan titreşimlerin en önemli kısmının yayılma yönünde meydana geldiği açıktır. Düzlem dışı titreşim söz konusu olduğunda, aynı ölçek için yalnızca hafif gölgeler teşhis edilebilmektedir. Daha yavaş yayılan antisimetrik bükülme dalgaları, zgenliklerinde plakanın orta bölgesinde tanımlanabilir. Hareket fraksiyonu düzlem dışı düzlemdekinden daha büyüktür.

Bununla birlikte, bu ifade yalnızca, gerçek durumun tersine döndüğü ve anizotropik malzemelerde açısal olarak bağımlı olduğu belirli sınırlayıcı frekanslara kadar doğrudur. Hem anizotropik hem de yönsel değerlerde, eğilmenin levhanın boyuna sertliğine oranı, kesme frekansı üzerinde bir etkiye sahiptir.



### 11

Bir anizotropik panelde sıkıştırma dalgaları: x (sol), y (yukarı), z (orta) ve x+y yönündeki genlikler (altta)

### Dalga Etkileşiminden Kaynaklanan Yapısal Hasarın Tespiti

Giriş bölümünde belirtildiği gibi, yapısal hasar ve malzeme hataları sıklıkla ayırt edilemez. Önemli bir örnek, genellikle katmanlara ayrılma, yani tek tek laminat katmanlarının birbirinden ayrılması olarak ortaya çıkan CFRP yapılarında oluşabilecek darbe hasarıdır.

### Hasar Tespit Deneyi

Referans verileri elde etmek için hasarsız, yarı izotropik olarak lamine edilmiş bir CFRP paneli üzerinde 3D ölçümler gerçekleştirilir. Uyartım v = sin( $\omega$ t) \* sin( $\frac{1}{4}\omega$ t) formülüne göre sinus pencereli bir yayılım sinyali ile iki sinus dalga periyodu boyunca piezoseramik wafera uygulanır ve ölçümler zaman domeninde gerçekleşir.

Şekil 12, sinyali ve sinyalin genlik spektrumunu gösterir.Pencere fonksiyonu uygulanması, spektrumdaki istenmeyen ikincil maksimumları azaltır. Deney, farklı uyartım frekansları için tekrarlanır. Başlangıçta, bir grup sıkıştırma dalgası gözlem alanından geçer, hemen arkasından, düşük faz hızının nedeni ile bir grup bükülme dalgası geçer. Darbe alanında hasara neden olmak için, 2,5 J kinetik enerji ve 12,5 mm2 dairesel darbe alanına sahip bir çekiç, panelin arka tarafına çarpar. Bu, yüzeyde 0,05 mm derinliğinde bir baskı yaratır. (şekil 13)

**12** Uyart

Uyartım sinyalinin zaman domeninde genliği (üstte), sinyalin spekturumu (altta)





Hasar sonrası aynı koşullarda ölçümler tekrarlanmıştır. Şekil 14, çarpma olayından önce (sağga) ve sonra (solda) gözlem alanındaki düzlem dışı (out of plane) hız alanının bir anlık görüntüsünü göstermektedir. Örnek olarak burada 50 kHz'lik bir uyartım kullanılmıştır. Sağdaki anlık görüntüde, dairesel ikincil dalgalar nedeniyle kusur belli belirsiz tanımlanabilir. İki veri kaydı arasındaki fark, sinyal işlemcisi (yazılım seçeneği PSV 8.7 veya üstü) kullanılarak veya MATLAB aracılığıyla görüntülenir.

Şekil 15, solda yalnızca düzlem dışı bileşenleri göstermektedir; ortada, yalnızca düzlem içi bileşenler; ve sağda, tüm titreşim yönleri aynı anda gösterilmiştir.

Fark datası, yapısal hasarın konumunun açık bir göstergesidir. Burada ayrıca, düzlem dışı titreşimlerin, düzlem içi titreşimlerden çok daha net sonuçlar verdiği açıkça görülmektedir.

Sadece birincil S<sub>0</sub>-grubunun (şekil 16, sol) geçişinin değil, aynı zamanda A<sub>0</sub>-grubunun(şekil 16, sağ) sonraki geçişinin de hasar çevresinde oluşan yeni eğilme dalgalarına yol açtığı, durağan fotoğraflardan anlaşılmayan bir gerçektir.. Ancak farkı gösteren resim (şekil 15), birincil A<sub>0</sub> grubu için daha büyük ikincil dalgaları gösterir.

### 13

Yukarıda: Çekicin ön yüzü

Aşağıda: 2.5J sonrası olusan baskı

### 14

Düzlem dışı hız alanı, solda darbe öncesi sağda darbe sonrası





### 15

Fark datası Sol : düzlem dışı Orta : düzlem içi Sağ : tüm bileşenler



### 16

50 kHz'de çarpmadan sonra ölçüm alanındaki birincil sıkıştırma dalgaları (üstte) ve bükülme dalgaları (altta) (düzlem dışı hız alanları)



### Özet

Tarayıcı lazer vibrometresi kullanılarak Lamb dalga yayılımının gözlemlenmesi, panel yapılarında hasar tespiti için umut verici bir araçtır. Ölçümler hem sıkıştırma hem de bükülme dalgalarının gözlemlenmesine izin verir. Tüm dalga alanının yayılması görünür hale getirilir, böylece yapısal özellikler hakkında sonuçlar çıkarılmasına izin verilir.

1D ölçüm teknolojisi kullanılarak her zaman ortaya çıkan sistematik hatalar, 3D ölçüm teknolojisi kullanılarak önlenebilir ve daha kesin sonuçların alınmasını sağlar.

Kusurlar, öncelikle mod dönüşümünden oluşturulan ikincil dalgalar biçiminde, dalga alanındaki bozulmalar olarak görselleştirilir. Bu nedenle, bu yöntem kullanılarak, konvansiyonel ultrasonik test kullanılarak tespit edilmesinin mümkün olmadığı veya ancak önemli ölçüde ekstra masraf ve karmaşıklık ile mümkün olduğu durumlarda numunelerde kusurlar tespit edilebilir.

### Yazarlar

Dipl.-Ing. (FH) Mirko Nikolaj Neumann and Prof. Dr.-Ing. Rolf Lammering, Mechanics Institute, Helmut Schmidt University -University of the Federal Armed Forces Hamburg, Germany

Dr. Jochen Schell and Dr. Reinhard Behrendt, Polytec GmbH





### Polytec GmbH (Germany)

Polytec-Platz 1-7 76337 Waldbronn Tel. +49 7243 604-0 info@polytec.de

Polytec GmbH (Germany) Vertriebs- und Beratungsbüro Schwarzschildstraße 1 12489 Berlin Tel. +49 30 6392-5140

### Polytec, Inc.

(USA) North American Headquarters 16400 Bake Parkway Suites 150 & 200 Irvine, CA 92618 Tel. +1 949 943-3033 info@polytec.com

**Central Office** 1046 Baker Road Dexter, MI 48130 Tel. +1 734 253-9428

East Coast Office 1 Cabot Road Suites 101 & 102 Hudson, MA 01749 Tel. +1 508 417-1040

## X

Polytec Ltd. (Great Britain) Lambda House Batford Mill Harpenden, Herts AL5 5BZ Tel. +44 1582 711670 info@polytec-ltd.co.uk

### Polytec France S.A.S.

Technosud II Bâtiment A 99, Rue Pierre Semard 92320 Châtillon Tel. +33 1 496569-00 info@polytec.fr

### ٠ Polytec Japan

Arena Tower, 13th floor 3-1-9, Shinyokohama Kohoku-ku, Yokohama-shi Kanagawa 222-0033 Tel. +81 45 478-6980 info@polytec.co.jp

**Polytec South-East Asia** Pte Ltd Blk 4010 Ang Mo Kio Ave 10 #06-06 TechPlace 1 Singapore 569626 Tel. +65 64510886 info@polytec-sea.com

### \*0 Polytec China Ltd.

Room 402, Tower B Minmetals Plaza No. 5 Chaoyang North Ave Dongcheng District 100010 Beijing Tel. +86 10 65682591 info-cn@polytec.com

www.polytec.com 🖬 🎔 G+ 🖬 🌾 🗅