

İnce Düzlemlerde Yayılan Ultrason Dalgası Kullanılarak Hedef Uzaklığının Kestirilmesi

Tuğba Özge Onur^{1*}, Johan E. Carlson², Erika Svanström³, Rifat Hacıoğlu¹

¹Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 67100, Zonguldak, Türkiye

²Luleå University of Technology, Div. of Signals and Systems, SE-971 87 Luleå, İsveç

³Luleå University of Technology, EISLAB, SE-971 87 Luleå, İsveç

(Geliş Tarihi/Received: 23.11.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 23.02.2017)

ÖZ

Elastik dalgalar, sadece gaz ve sıvılarda değil aynı zamanda katılarda da yayılırlar. Katılar, sıvı ve gazlarda olmayan form elastisitesine sahip olduğundan, katıların elastik özellikleri farklıdır. Bu nedenle, sadece boylamsal dalgalar değil aynı zamanda diğer dalgalar da katılarda yayılabilir. Katı içinde yayılan dalgalar kullanılarak hedefin konumu hakkında bilgi edinilebilir. Bu çalışmada ince düzlemlerde tek transdüktör kullanılarak ultrasonik dalga yayılımının modellenmesi yapılarak, uyarlamalı algoritma ile hedef uzaklığı kestirilmektedir. Elde edilen sonuçlarda, modellenen dalga yayılımında ultrasonik dalganın hızı ile birlikte zaman gecikmesi uyarım noktasının sensöre olan uzaklığı ile ilintili olduğu için, uyarlamalı algoritma ile darbe cevabı başlangıç noktası belirlenerek hedef konumunun tespit edilebildiği görülmektedir.

Anahtar kelimeler: Elastik dalgalar, İnce düzlem, Ultrasonik dalga yayılımı, Hedef uzaklığının kestirilmesi

Estimation of Target Distance by Using Propagating Ultrasound Wave in Thin Plates

ABSTRACT

Elastic waves propagate not only in gases and liquids but also in solids. The elastic properties of solids are different since they have form elasticity which liquids and gases don't have. Because of this reason, not only longitudinal waves but also other waves can propagate in solids. Waves propagating in solids can be used to get information about target location. In this paper, modelling of ultrasonic wave propagation in thin plates is investigated by using a single transducer and target distance is estimated with adaptive algorithm. According to the obtained results, it can be seen that target location can be estimated by detecting the starting point of the impulse response with adaptive algorithm since the delay along with the velocity of ultrasound wave in the modelled wave propagation is related to the distance between the excitation point and sensor.

Keywords: Elastic waves, Thin plates, Ultrasound wave propagation, Estimation of target distance

1. Giriş

Ses ötesi transdüktör dizileri tıbbi görüntüleme uygulamalarında ve endüstrinin bazı alanlarında olduğu gibi katılarda hedef uzaklığının bulunması amacıyla uzun süredir kullanılmaktadır.

Dizilerin kullanımı, ses hüzmesine alıcı ya da verici modunda odaklanmayı sağlar (Fink, 1992). Odaklanma, transdüktörlerin herhangi bir mekanik yer değiştirilmesi yapılmadan elektronik olarak yapılır. Ayrıca endüstride bazı tahribatsız test etme uygulamaları da vardır fakat yüksek donanım maliyeti gerektirdiğinden fazla kullanılmaz (Fink, 1992). Bu nedenle, donanım maliyetinin yüksek olduğu bu teknikler yerine düşük maliyetli tekniklerin geliştirilebilmesi önemli bir araştırma konusudur. Bu çalışmada, transdüktör dizisi yerine tek bir transdüktör ve elastik dalga modeli kullanılarak, elde edilen dalga yayılımı işaretinden hedef yerinin tespit edilmesi amaçlanmaktadır.

Transdüktör dizisi kullanılarak ses hüzmesine odaklanmanın teorik ve deneysel incelemesi birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir (Angelsen et al., 1995; Stephens et al., 2011; Fan et al., 2014). Odaklanma Fink'in ele aldığı akustik zaman-tersleme prensibine dayanarak yapılabilir (Fink, 1992). Transdüktör dizisi kullanan geleneksel gecikme-hattı hüzmeleme homojen ortamda sesi odaklamada kullanılabilir. Diziye yakın yerleştirilmiş homojensizlik olduğu zaman faz sapmalarını düzeltmek için farklı teknikler kullanılmalıdır (Fink, 1992). Ortam saçıcılar veya farklı ses hızına sahip katmanlar içerdiğinde ise, gecikme-hattı hüzmeleme çalışmayacaktır. Tek dizili Zaman-Tersleme Aynası (Time-Reversal Mirror- TRM) kullanılarak, çoklu saçılma olmadığı sürece ortamda ses hızı değişse bile tek bir saçıcı

yerleştirilebilir. Birkaç hedef olduğu zaman ise iteratif TRM hedefi seçmek için kullanılabilir (Prada and Fink, 1994).

Çoklu hedef belirlemede daha yüksek yansıtılabilirliğe sahip hedefe odaklamak için iteratif zaman tersleme tekniği kullanılabilir (Prada and Fink, 1994). Ancak çoğu durumda diğer yansıtıcılara nasıl odaklanılacağını belirlemek oldukça zordur. Çoklu belirlemeyi gerçekleştirmek ve bilinmeyen çok hedefli bir ortamda her bir yansıtıcıya odaklamak için Prada ve arkadaşları tarafından matris biçimli bir yaklaşım ileri sürülmüştür (Prada and Fink, 1994; Prada et al., 1995; Prada et al., 1996). Zaman Tersleme Operatörünün Ayrıştırılması (Decomposition of the Time Reversal Operator- DORT) olarak bilinen bu tekniği kullanarak Chambers ve Gautesen (2001) zaman tersleme operatörünün kompleks ve bilgi verici olabileceğini göstermişlerdir.

R.K Ing ve arkadaşları (2001), tek transdüktör gerektiren yeni bir odaklama tekniği önermişlerdir. Daha sonra bu teknik geliştirilerek darbe-eko modunda kullanılması sağlanmıştır (Ing et al., 2001). Ultrasonik darbe-eko metodu, geri saçılmış ekoları inceleyerek konumları, boyutları, yönleri ve mikro yapılarına göre yansıtıcıların fiziksel özelliklerini tanımlamak için yayılma yolunu karakterize etmeyi amaçlar (Saniie, 1981). Bu doğrusal sistem, yayılma yolu cevabı (propagation filter, yayılma filtresi) ve hedef cevabı olarak ayrıştırılabilir (Jensen, 1991). Sandell ve Grennberg'e (1995) göre hedefin konumu,

yayıma yolunda empedans uyumsuzluğu ile belirlenen hedeften yansıtılan ekonun varış zamanının (Time of Arrival- TOA) kestirimine dayanır.

Montaldo ve arkadaşları (2004) tarafından da çok hedefli seçici odaklama için zaman tersleme operatörünün deneysel olarak elde edilmesini gerektirmeyen gerçek zamanlı bir teknik geliştirilmiştir (Montaldo et al. 2004). Bu teknikle, en çok yansıtıcı saçıcı seçilebilmiştir.

Bu çalışmada, ince düzlemlerde, ultrasonik dalga yayılımının teorik olarak modellenmesi ve deneysel incelemesi yapılmaktadır. Bu çalışmada, literatürde verilen ve daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak, yüksek maliyetli transdüktör dizisi yerine tek bir transdüktör ve uyarlamalı algoritma kullanılarak, hedeften gelen bilgi gürültüden arındırılarak, elde edilen dalga yayılımı işaretinden hedef yerinin tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada ses dalgası elastik dalga olarak modellenmektedir. Bölüm 2’de ince düzlemlerde elastik dalga yayılması için türetilen model verilmektedir. Bölüm 3’te, türetilen model ile uyarım noktasının kestirilmesi için gürültünün yok edilmesinde kullanılan uyarlamalı algoritma anlatılmaktadır. Bölüm 4’te, yapılan deneysel çalışmalar verilmektedir. İnce düzlemlerde yayılan ultrasonik dalga kullanılarak hedef uzaklığının kestirilmesi ile ilgili deneysel çalışmalardan edilen sonuçlar kullanılarak yapılan simülasyonlar ile ilgili

bulgular Bölüm 5’te verilmiştir. Bölüm 6, çalışmanın sonuçlarını içermektedir.

2. İnce Sonsuz Düzlemlerde Elastik Dalga Yayılımının Türetilmesi

Fällström ve arkadaşlarına göre darbeden r uzaklıktaki bir mesafede t zamanında parçacık yer değiştirmesi $w(t,r)$ aşağıdaki gibi ifade edilir (Fallström et al., 2002);

$$w(t,r) = \frac{a}{4\pi D} \left(\frac{\pi}{2} - \int_0^{\frac{\beta^2}{4}} \frac{\sin x}{x} dx \right) \quad (1)$$

ki burada,

$$\beta = \frac{r}{\sqrt{at}}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{D}{\rho h}}, \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\sigma^2)} \quad (2)$$

şeklinde olup, β benzerlik parametresi, α düzlem parametresi, D düzlem sertliği, h düzlem kalınlığı, E Young’s modülü ve σ Poisson oranıdır. İnce düzlemlerde elastik dalga yayılımının teorik olarak modellenebilmesi için (2) eşitliği ele alınarak (1) eşitliği tekrar düzenlenirse,

$$\begin{aligned} w(t,r) &= \frac{a}{4\pi D} \left(\frac{\pi}{2} - \int_0^{\left(\frac{r}{\sqrt{at}}\right)^2} \frac{\sin x}{x} dx \right) \\ &= \frac{a}{4\pi D} \left(\frac{\pi}{2} - \int_0^{\frac{r^2}{4at}} \frac{\sin x}{x} dx \right) \\ &= \frac{a}{4\pi D} \left(\frac{\pi}{2} - \pi \int_0^{\frac{r^2}{4at}} \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} dx \right) \\ &= \frac{a}{4D} \left(\frac{1}{2} - \int_0^{\frac{r^2}{4at}} \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} dx \right) \end{aligned} \quad (3)$$

elde edilir. (3) eşitliğinde elde edilen parçacık yer değiştirmesi kullanılarak parçacık hızı,

$$\begin{aligned} c_p(t,r) &= \frac{\partial w(t,r)}{\partial t} \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \frac{a}{4D} \left(\frac{1}{2} - \int_0^{\frac{r^2}{4\pi at}} \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} dx \right) \\ &= \frac{a}{4D\pi t} \sin\left(\frac{r^2}{4at}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

elde edilir. Bu eşitlikten $t \rightarrow 0$ oldukça sinüs ifadesinin sonsuza gittiği görülebilir. Buna fiziksel bir anlam katmak için ayrıca $t \rightarrow 0$ oldukça ses hızının (faz hızı) sonsuza gittiği varsayılmalıdır. Ancak bu varsayım, gerçekte bir düzlemdeki durum için geçerli değildir. Ashında, $c_p(t,r)$ için örneklenen veriler kullanıldığında, elde edilen işaretler $f \in [0, f_s/2]$ 'de bandsınırlıdır. Burada, f_s ölçüm sisteminin örnekleme frekansdır. Bu nedenle, işaretin bu band sınırını içermesi için, sinüs frekansının $f_s/2$ 'den yüksek olduğu zaman çalışılmalıdır. $\sin \theta(t,r)$ 'nin anlık frekansı,

$$\theta(t,r) = \frac{r^2}{4at} \quad (5)$$

için,

$$\phi(t,r) = \frac{d}{dt} \theta(t,r) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \phi(t,r) &= \frac{d}{dt} \frac{r^2}{4at} \\ &= \frac{r^2}{4a} \frac{1}{t^2} \end{aligned} \quad (7)$$

elde edilir. Bu durumda, hangi t zamanı değerinin $\phi(t,r) \geq f_s/2$ anlık frekansı olduğunun belirlenmesi gerekir.

$$\begin{aligned} \frac{r^2}{4a} \frac{1}{t^2} &\geq \frac{f_s}{2} \\ t &\leq \frac{r}{\sqrt{2af_s}} \end{aligned} \quad (8)$$

(8)'de elde edilen t zamanının altındaki değerlerde parçacık hızı $c_p(t,r)$ sıfırdır. Başka bir deyişle f_s örnekleme frekansı ile örneklenen bir sistem için, parçacık hızı;

$$c_p(t,r) = \begin{cases} \frac{a}{4D\pi t} \sin(\theta(t,r)), & t > \frac{r}{\sqrt{2af_s}} \\ 0, & t \leq \frac{r}{\sqrt{2af_s}} \end{cases} \quad (9)$$

elde edilir.

Düzlemin sensörden r uzaklıkta bulunan bir kaynak işareti ile uyarıldığı ve sensörün doğrusal, zamanla değişmez (DZD) bir

sistem olduğu varsayıldığında, giriş işareti belli bir miktar ötelenğinde çıkış işareti de aynı miktarda ötelenir. DZD sistemin girişine birim darbe işlevi uygulandığında elde edilen çıkış DZD sistemin birim darbe yanıtıdır. Sistem doğrusal olduğu için, giriş bir sabit katsayı ile ölçeklendiğinde çıkış da aynı oranda ölçeklenir (Haykin, 1996; Onur ve Hacıoğlu, 2014). Bu çalışmada, kaynak uyarımı ve ultrasonik sensör darbe cevabının modellenmesi için sonlu darbe cevabı (Finite Impulse Response- FIR) model yapıları kullanılmıştır.

Eşitlik (7)'de elde edilen sensörden r uzaklıkta bir noktadan başlayan elastik dalga yayılımında, eğer, düzleme ait kalınlık h ve yoğunluk ρ parametrelerinin bilindiği varsayılırsa, elde edilen model sadece bir bilinmeyen ile parametre (D) ile ifade edilebilir. Başka bir deyişle, dalga yayılımı $c_p(t, r; D)$ şeklinde yazılabilir. Pratikte, ölçülen işaret $u(t, r; D)$; uyarım işareti, düzlem transfer fonksiyonu ve sensör transfer fonksiyonunun konvolüsyonudur. Böylece $u(t, r; D)$,

$$u(t, r; D) = h_e(t) * c_p(t, r; D) * h_r(t) \quad (10)$$

şeklinde ifade edilebilir ki burada, $*$ konvolüsyon işlemi gösterir. $h_e(t)$ ve $h_r(t)$ işaretleri ise sırasıyla uyarımın (kaynak işaretinin) ve alıcının (sensörün) darbe cevaplarıdır. Başka bir deyişle, ölçülen işaret $c_p(t, r; D)$ değil $u(t, r; D)$ olacaktır. İşaret modeli doğrusallık özelliği ile,

$$u(t, r; D) = h_{er}(t) * c_p(t, r; D) \quad (11)$$

şeklinde yazılabilir.

3. Uyarım Noktasının Kestirilmesi İçin Elastik Dalga Modeli Kullanılarak Oluşturulan Modelde Gürültünün Yok Edilmesi

Elastik dalga modeli kullanılarak uyarım noktasının kestirilmesi için oluşturulan modelde gürültünün yok edilmesi için En Küçük Kareler (LMS- Least Mean Squares) algoritması kullanılmaktadır ve uyarım ve sensör darbe cevabı birleşimi $h_{er}(t)$ modelinin kestirilmesi gerekmektedir. Eşitlik (11) düzenlenerek gerçek ortamda oluşturulan deney düzeneği ile alınan işaret,

$$u(t, r; D) = h_{er}(t) * h_{SIR}(t, r; D) + v(t) \quad (12)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, dalganın yayıldığı düzlemin uzamsal darbe cevabı (SIR- Spatial Impulse Response) $h_{SIR}(t, r; D)$ olarak yazılabilir. Ayrıca (12) eşitliğinde r uyarım ve sensör arasındaki mesafeyi; t zamanı; $v(t)$ sıfır ortalamalı σ_v^2 varyanslı Gauss gürültüsünü göstermektedir.

LMS metoduna göre, ağırlıklı hata karelerinin toplamını içeren başarı göstergesi minimize edilir. Burada hata istenen cevap ile gerçek modeli arasındaki fark olarak tanımlanır. Uyarılar süzgeç katsayılarının güncellenmesi için yinelemeli

bir algoritma olan LMS, en önemli uyarılma algoritmalarından biridir (Haykin, 1996). Bu çalışmada, FIR model yapısı kullanılarak türetilen LMS algoritmasında sırasıyla regresör vektörü ve parametre vektörü kestirimi,

$$\varphi(n) = \begin{bmatrix} u(n) \\ \vdots \\ u(n - M + 1) \end{bmatrix}$$

$$\hat{\theta}(n) = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_0(n) \\ \vdots \\ \hat{\theta}_{M-1}(n) \end{bmatrix}$$

verilirse filtre çıkışı;

$$\hat{y}(n) = \hat{\theta}^T(n)\varphi(n) \quad (15)$$

olur ve kestirim hatası veya hata işareti;

$$e(n) = y(n) - \hat{y}(n) \quad (16)$$

Bu durumda ağırlık parametre vektörü;

$$\hat{\theta}(n) = \widehat{\hat{\theta}(n-1)} + \mu\varphi(n)e(n) \quad (17)$$

ile iteratif olarak elde edilir. Eşitlik (15) ve (16), (17) eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(n) &= \hat{\theta}(n-1) \\ &+ \mu\varphi(n) \left(y(n) - \varphi^T(n)\hat{\theta}(n) \right) \\ &= \hat{\theta}(n-1) + \mu\varphi(n)e(n) \end{aligned} \quad (18)$$

elde edilir. Burada, adım boyutu parametresi μ , yakınsamayı sağlayan pozitif küçük bir sabittir (Haykin, 1996).⁽¹³⁾

4. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalarda kullanılan ölçüm düzeneği cam dikdörtgen plakadan oluşmaktadır ve üzerinde bir ultrasonik sensör bulunmaktadır. Cam üzerinde belirli noktalarda uyarım yapıldığında sensörden alınan işaretler incelenmiştir. Hedef konumunu belirleyen r uzaklık parametresi, Şekil 1'de verilen deney düzeneği ile deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen ölçümler kullanılarak kestirilmiştir.⁽¹⁴⁾

Tablo 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan cam plaka özellikleri.

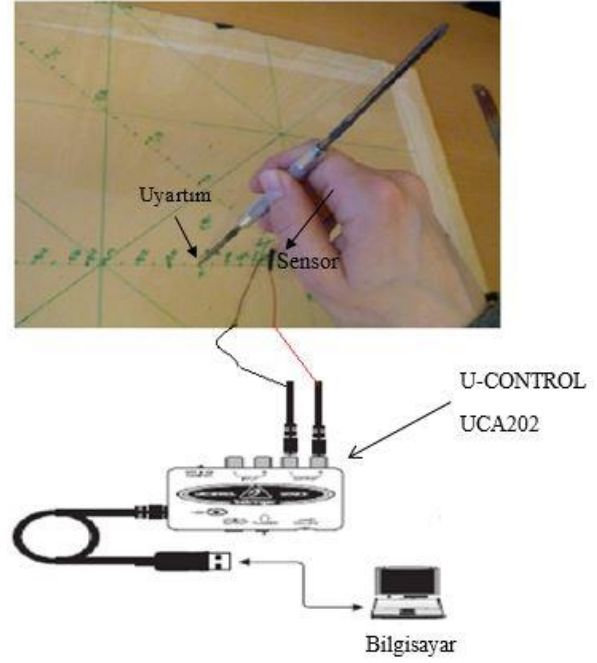
Plaka Özellikleri	
Kalınlık (m)	0.002
Yoğunluk (kg/m ³)	2.5 x 10 ³
Ağırlık (kg)	1.2
Boyut (m)	0.49 x 0.57
Yüzey Yoğunluğu (kg/m ²)	5
Düzlem Sertliği (Nm)	49.4635

Bu çalışmada, özellikleri Tablo 1'de verilen cam plaka kullanılmıştır. Düzlem sertliği parametresi D , Poisson oranı σ ve Young's

modülü E değerleri deney düzeneğindeki plaka için literatür verileri kullanılarak belirlenmiştir (Le Bourhis, 2008). Belirlenen bu literatür verileri ve Tablo 1’de verilen yüzey yoğunluğu, kalınlık ve düzlem sertliği değerleri kullanılarak parçacık hızı ve düzlemin uzamsal darbe cevabı hesaplanmaktadır. Deney düzeneğinde alıcı olarak kullanılan sensör, cam plaka üzerinde orta noktaya yerleştirilmiştir. Bunun nedeni, düzeneğin üzerinde uyartım yapıldığında kalibrasyonun sağlanabilmesidir. Sensör cam plaka üzerine izole band kullanılarak sabitlenmiştir.

Ölçüm düzeneği üzerine uygun bir şekilde yerleştirilen sensörden alınan ölçüm verileri veri toplama düzeneği kullanılarak bilgisayara aktarılmaktadır. Bunun için Şekil 1’de verilen iki giriş-iki çıkışlı, USB kontrollü, Behringer marka, U-CONTROL UCA202 model cihaz ile Şekil 1’de verilen blok şema kullanılarak veriler bilgisayara aktarılmıştır.

Ölçüm düzeneğinde uyartım, kalibrasyonun sağlanabilmesi için sensöre eşit uzaklıktaki belirli noktalarda sivri uçlu metal bir çubuk kullanılarak manuel olarak yapılmıştır. Uyartım yapılırken kullanılan metal çubuğun ucunun ölçüm yüzeyine tam olarak temas etmesine ve uyartımların ritmik bir şekilde yapılmasına dikkat edilmiştir. Uyartım süresince sensörden alınan ölçümler oluşturulan düzeneğin kullanılarak bilgisayara aktarılmıştır.



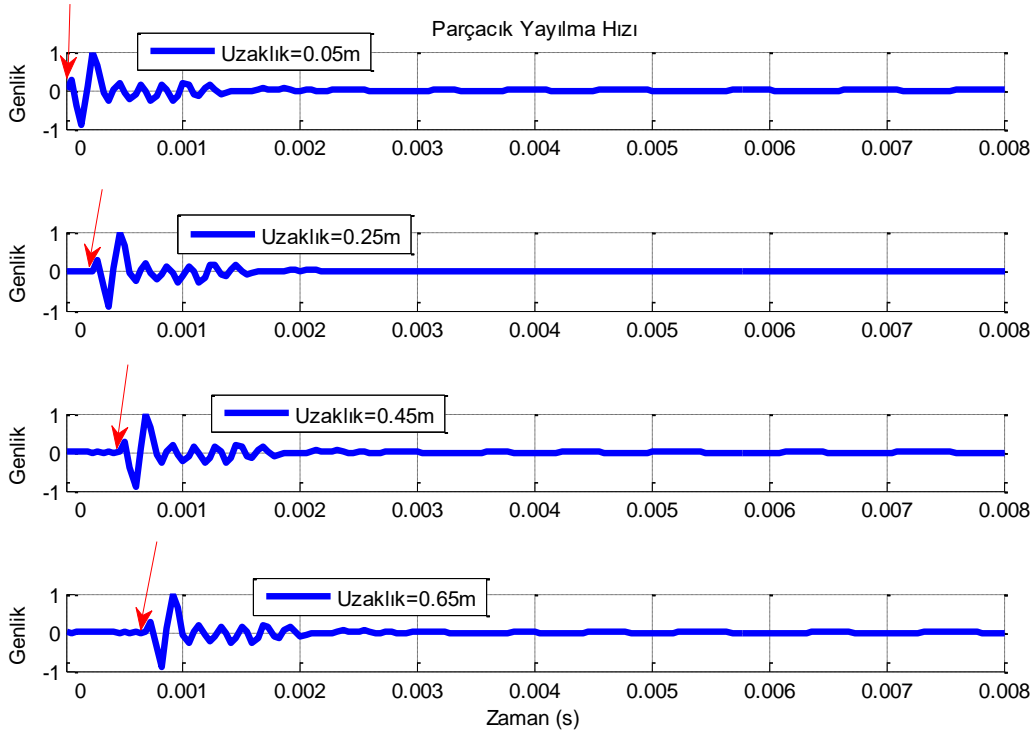
Şekil 1. Ölçüm verilerinin bilgisayara aktarılması.

5. İnce Düzlemlerde Yayılan Ultrasonik Dalga Kullanılarak Hedef Uzaklığının Kestirilmesi İle İlgili Bulgular

Ölçümler sırasında, kullanılan her malzeme için elde edilen sonuçlarda örnekleme frekansı f_s için 48 kHz değeri, düzlem sertliği parametresi D için [34.2091 64.7179] (Nm) değer aralığı, Poisson oranı σ için [0.16 0.27] değer aralığı, Young’s Modülü E için [50x10⁹ 90x10⁹] (Pa) alınmıştır (Le Bourhis, 2008). Ayrıca, uyarlamalı algoritma için adım boyutu parametresi olan μ değeri 0.01 olarak seçilmiştir. Ölçümlerden alınan veriler Eşitlik (12)’de teorik olarak türetilen dalga yayılım modeline uygulanmıştır ve Eşitlik (13)-(18) ile verilen işlem adımları uygulanarak hedef konumu kestirilmeye çalışılmıştır.

Şekil 2’de yatay eksen zaman ve dikey eksen normalize genlik olmak üzere sensörden farklı uzaklıklarda yapılan uyarımlar sonucu elde edilen parçacık yayılma hızı grafikleri görülmektedir. Uyarım, sensörden sırası ile 0.05 m, 0.25 m, 0.45 m ve 0.65 m uzaklıklarda sivri uçlu bir metal çubuk kullanılarak yapılmıştır. Alınan işaretler yaklaşık 8 ms kaydedilmiştir. Uyarım sensörden 0.005 m, 0.25 m, 0.45 m ve 0.65 m uzaklıkta olduğunda, Şekil 2’de kırmızı oklarla gösterilen modellenen işaretteki

gecikmenin sırası ile 0.00454 ms, 0.2473 ms, 0.4446 ms ve 0.6464 ms olduğu görülmüştür. Şekil 2’de de görüldüğü gibi, ölçümler kullanılarak modellenen işarette gecikme yaklaşık olarak uyarım noktasının sensöre olan uzaklığı kadardır ve uyarım noktasının hedefe olan uzaklığı arttıkça parçacık hızı genliği azalarak daha gecikmeli ve salımlı işaretler elde edilmektedir. Kaynak uyarımı ve ultrasonik sensör darbe cevabının modellenmesi için 10. derece FIR filtre kullanılmıştır.



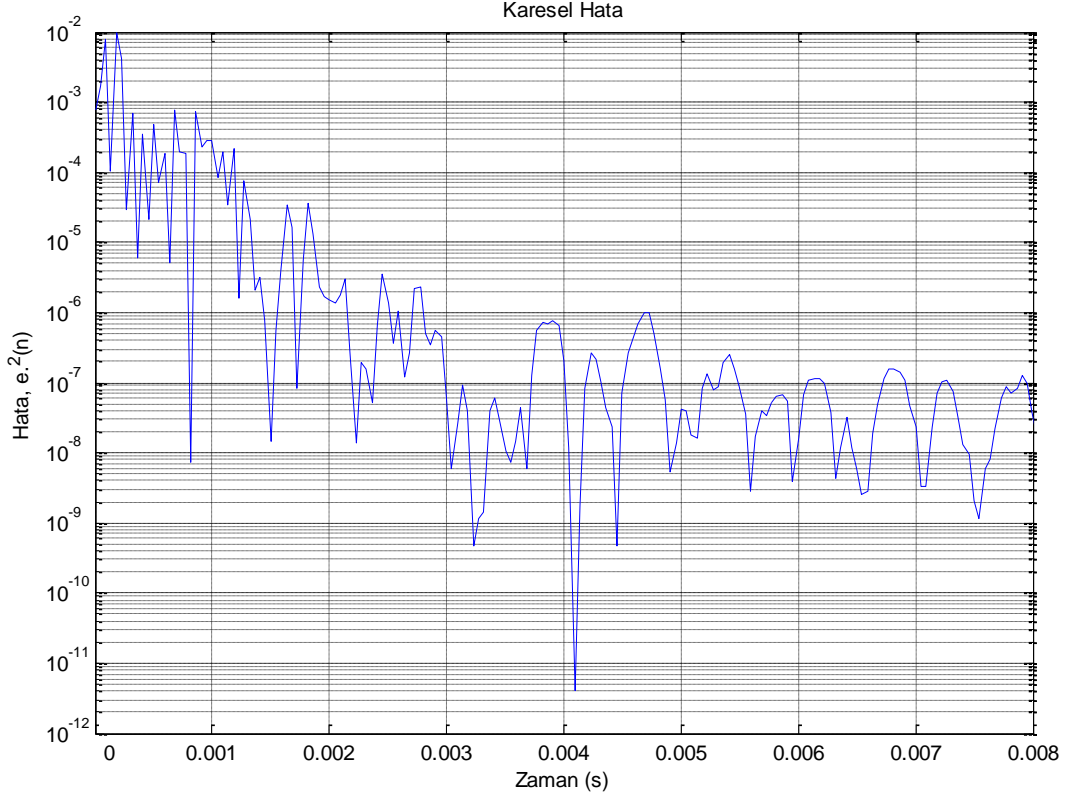
Şekil 2. Hedeften farklı uzaklıktaki uyarımlarla elde edilen parçacık yayılma hızı.

Şekil 3’te kullanılan uyarlamalı algoritma için zamana göre karesel hata değişimi görülmektedir. Kaynak uyarımı ve ultrasonik sensör darbe cevabı modellenirken yakınsama yaklaşık 2 ms civarında olmaktadır ve ortalama karesel hata değeri 1.3502×10^{-5} ’tir.

6. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, ses ötesi dalgalar, ince düzlemlerde elastik dalga olarak modellenmiştir. Sınırlı düzlem için teorik olarak modellenen elastik dalga yayılması yani alıcıdan alınan dalga şekli, deneysel ölçümlerden alınan işaretlerle test edilmiştir.

Elde edilen sonuçlarda, ölçümler Ayrıca, uyartım noktasının hedefe olan kullanılarak modellenen işarete gecikme uzaklığı arttıkça, yayılma hızının uyartım noktasının sensöre olan uzaklığı azalmaktadır ve işaretlerin salınımlarının ve kadar olduğu için, model kullanılarak hedef gecikmesi artmaktadır. konumunun tespit edilebileceği görülmüştür.



Şekil 3. LMS algoritması karesel hata değişimi.

7. Kaynaklar

Angelsen, B.A.J., Torp, H., Holm, S., Kristoffersen, K., Whittingham, T.A., 1995. Which Transducer Array Is Best?. *European Journal of Ultrasound*, 2: 151-164.

Chambers, D.H., Gautesen, A.K., 2001. Erratum: Time Reversal For A Single

Spherical Scatterer. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 109(6): 2616-2624.

Fallström, K.E., Gren, P., Mattsson, R. 2002. Determination Of Paper Stiffness And Anisotropy From Recorded Bending Waves In Paper Subjected To Tensile Forces. *NDT&E International*, 35: 465-472.

Fan, C., Caleap, M., Pan, M., Drinkwater, B. W., 2014. A Comparison Between Ultrasonic Array Beamforming and Super Resolution Imaging Algorithms

- For Non-destructive Evaluation. Ultrasonics, 54(7): 1842-1850.
- Fink, M., 1992. Time-reversal of Ultrasonic Fields-Part I: Basic Principles. IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelec. and Freq. Contr., 39(5): 555-566.
- Haykin, S. 1996. Adaptive Filter Theory, New Jersey: Prentice Hall.
- Ing, R.K., Catheline, S., Quieffin, N. and Fink, M. (2001). Dynamic Focusing Using A Unique Transducer Time Reversal Process. *In Proc. of the 8th Int. Congress on Sound and Vibrations*, July 2-6.
- Jensen, J.A., 1991. A Model For The Propagation And Scattering Of Ultrasound In Tissue. J. Acoust. Soc. Amer., 89(1): 182-190.
- Le Bourhis, E. 2008. Glass-Mechanics and Technology. Weiheim: Wiley-VHC.
- Montaldo, G., Tanter, M., Fink, M., 2004. Revisiting Iterative Time Reversal Processing: Application To Detection Of Multiple Targets. J. Acoust. Soc. Amer., 115: 776-784.
- Onur T.Ö. ve Hacıoğlu R. (2014). Dalga Kılavuzu ile Ultrasonik Konum Belirleme. *IEEE 22. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı*, SIU 2014, 23-25 Nisan 2014, Trabzon, sayfa: 1323-1326.
- Prada, C., Fink, M., 1994. Eigenmodes Of The Time Reversal Operator: A Solution To Selective Focusing In Multiple-target Media. Wave Motion, 20: 151-163.
- Prada, C., Manneville, S., Spoliansky, D., Fink, M., 1996. Decomposition Of The Time Reversal Operator: Detection And Selective Focusing On Two Scatterers. J. Acoust. Soc. Amer., 99(4): 2067-2076.
- Prada, C., Thomas, J.L., Fink, M., 1995. The Iterative Time Reversal Process: Analysis Of The Convergence. J. Acoust. Soc. Amer., 97(1): 62-71.
- Sandell, M., Grennberg, A. 1995. Estimation Of The Spatial Impulse Response Of An Ultrasonic Transducer Using A Tomographic Approach. J. Acoust. Soc. Amer., 98(4): 2094-2103.
- Saniie, J., 1981. Ultrasonic Signal Processing: System Identification and Parameter Estimation of Reverberant and Inhomogeneous Targets. PhD Thesis, Purdue University, West Lafayette, 323 pages.
- Stephens, D.N., Kruse, D.E., Qin, S., Ferrara, K.W., 2011. Design aspects of focal beams from high-intensity arrays. IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelec. and Freq. Contr., 58(8): 1590-1602.