

# محاسبه سرعت صوت در فولاد ای. آی. اس. آی. ۴۱۴۰ با استفاده از تکنیک معکوس تابع همدوسی

محسن اعیانی  
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک  
دانشکده مهندسی مکانیک  
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
safizadeh@iust.ac.ir

فرهنگ هنرور  
استاد دانشکده مهندسی مکانیک  
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
honarvar@kntu.ac.ir

سید عباس ارحام نمازی  
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک  
دانشکده مهندسی مکانیک  
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
arham\_namazi@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۵

## چکیده

از جمله کاربردهای آزمون غیرمخرب فراصوتی، اندازه‌گیری خواص مواد، همچون سرعت صوت، در آنهاست. برای اندازه‌گیری سرعت صوت در یک نمونه، می‌توان با استفاده از روش بازتابی، یک موج فراصوتی به‌داخل قطعه ارسال و اختلاف زمانی بین دو پژواک متوالی دریافتی از سطح پشتی قطعه را اندازه‌گیری کرد. در ساده‌ترین حالت، با اندازه‌گیری ضخامت نمونه و تقسیم ضخامت بر نصف اختلاف زمان دریافت دو پژواک، سرعت صوت در نمونه اندازه‌گیری می‌شود. در این مقاله با پردازش سیگنال فراصوتی سعی شده است که دقت اندازه‌گیری سرعت صوت در نمونه بهبود یافته و عدم قطعیت این اندازه‌گیری نیز تخمین زده شود. تکنیک مورد استفاده برای بالابردن دقت، معکوس تابع همدوسی است. این تابع همانند تابع همبستگی متقابل عمل می‌کند و به‌طور مشابه، بیشینه تابع همدوسی مقدار اختلاف زمانی بین دو پژواک را مشخص می‌کند. با به‌کارگیری این روش در نمونه‌هایی که ضریب میرایی بالایی دارند و یا به‌دلیل نوفه‌های ساختاری، نسبت سیگنال به نوفه در آنها پایین است، نتایج خوبی به‌دست می‌آید. چون در محاسبه تابع همدوسی از تحلیل طیف توان استفاده می‌شود، در سیگنال‌هایی با نسبت سیگنال به نوفه بسیار پایین نیز این روش دقت خوبی دارد. برای نشان‌دادن توانایی تکنیک معکوس تابع همدوسی، نمونه‌ای از جنس فولاد ای. آی. اس. آی. ۴۰۴۱ به ضخامت ۱۰ میلی‌متر مورد آزمایش قرار گرفت. اختلاف زمانی بین پژواک‌ها برای پنجاه بار تکرار اندازه‌گیری محاسبه و با میانگین‌گیری از این مقادیر و محاسبه انحراف معیار آنها مقدار اختلاف زمانی و عدم قطعیت به‌دست آمد. سپس با اندازه‌گیری دقیق ضخامت قطعه و اختلاف زمانی حاصل از معکوس تابع همدوسی و عدم قطعیت هر یک این مقادیر، مقدار سرعت صوت و عدم قطعیت آن محاسبه شد. مقایسه نتایج به‌دست آمده با نتایج موجود برای قطعه مورد آزمایش نشان می‌دهد که تکنیک معکوس تابع همدوسی دقت اندازه‌گیری سرعت صوت را افزایش داده است.

**واژگان کلیدی:** سرعت صوت، تابع همدوسی، آزمون فراصوتی، عدم قطعیت

## ۱. مقدمه

آزمون فراصوتی<sup>۱</sup> از جمله آزمون‌های غیرمخرب است که در آن از امواج فراصوتی فرکانس بالا برای بازرسی قطعات استفاده می‌شود. در این روش، امواج فراصوتی توسط یک تراگذار<sup>۲</sup> فراصوتی وارد قطعه می‌شوند. با دریافت موج عبوری یا بازتابی و مقایسه و پردازش آن، و اندازه‌گیری ضخامت نمونه می‌توان سرعت صوت را در نمونه اندازه‌گیری کرد [۱]. از سرعت صوت در مواردی چون شناسایی مواد یا اندازه‌گیری خواص مکانیکی، مثل مدول یانگ، ضریب پواسون و مدول برشی استفاده می‌شود.

در سال ۱۹۹۲ م، مک و گوئیته سرعت امواج طولی و عرضی را در دمای بالا در آلومینیوم ۶۰۶۱ اندازه‌گیری کردند [۲]. در سال ۱۹۷۱، دیت و همکاران مدول کشسانی و سرعت موج را در نمونه‌ای فولادی در دماهای زیر صفر و بالای صفر اندازه‌گیری کردند [۳]. در سال ۲۰۰۸، رومتویت و همکاران از امواج فراصوتی برای بازرسی همزمان قطعاتی که تحت خوردگی و فرسایش قرار داشتند استفاده کردند [۴].

برای پردازش سیگنال‌هایی که دارای نسبت‌های سیگنال به نوفه پایینی هستند، استفاده از روش تخمین طیف توان<sup>۳</sup> روشی مرسوم است. با استفاده از این روش می‌توان سیگنالی را که به نوفه زیاد آغشته شده است، شناسایی کرد. اولین روشی که برای تخمین طیف توان مورد استفاده قرار گرفت، در سال ۱۸۹۸ م توسط شوستر و همکاران [۵] ارائه شد. آنها از روش پریودوگرام<sup>۴</sup> برای تخمین طیف توان استفاده کردند. روش پریودوگرام در مواردی که میزان نسبت‌های سیگنال به نوفه بالا و طول سیگنال زیاد باشد، روش مناسبی است. در سال ۱۹۶۷ م، ولچ روش خود را معرفی کرد [۶]. این روش با استفاده از پنجره‌زنی<sup>۵</sup> سیگنال را جاروب کرده، تخمین طیف توان را برای سیگنال با طول زیاد می‌سازد. همچنین تخمین طیف با این روش از کیفیت بهتری برخوردار است. در سال ۱۹۷۳ کارتر و همکاران توانستند مقدار تابع همدوسی را با گرفتن از

سیگنالی که با پنجره‌های دارای همپوشانی جدا شده، محاسبه کنند [۷]. در سال ۱۹۸۲ تامسون بهترین روش تخمین طیف را در بین روش‌های غیرپارامتری تخمین طیف توان ارائه کرد [۸]. او این روش را مالتی تیپیر<sup>۶</sup> نامید. این روش از مقادیر ویژه<sup>۷</sup> محلی استفاده و خطای گرایش را در حد امکان کم می‌کند. در سال ۱۹۸۹ روزنبرگ و همکاران، و در سال ۲۰۰۷ سفری و مورایاما از تبدیل فوریه<sup>۸</sup> سریع معکوس، که از تابع همدوسی به‌دست می‌آید، برای اندازه‌گیری تأخیر زمانی بین دو پژواک استفاده کردند [۹ - ۱۰]. استفاده از این روش برای نسبت‌های سیگنال به نوفه<sup>۹</sup> پایین نیز جواب‌های مناسبی می‌دهد. این روش باعث بالارفتن قابلیت تکرار شده، نتایجی دقیق‌تری به‌دست می‌دهد. در این مقاله با استفاده از روش یادشده، نمونه‌ای از جنس فولاد ای. آی. اس. آی. ۴۱۴۰ آزمایش می‌شود و سرعت موج طولی در آن به‌دست می‌آید.

## ۲. تجهیزات

برای اندازه‌گیری سرعت موج طولی آزمایش بازتابی به‌روش غوطه‌وری در نظر گرفته شد. پروب مورد استفاده برای انجام این آزمایش، پروب موج طولی غوطه‌وری با فرکانس ۱۰ مگاهرتز بود. همچنین از یک دستگاه فرستنده و گیرنده فراصوتی مدل 5072PR، از محصولات شرکت الیمپوس و یک کارت A/D با فرکانس نمونه‌برداری 14 MSample/s و قابلیت تفکیک‌پذیری ۱۴ بیت برای تبدیل سیگنال‌ها از آنالوگ به دیجیتال استفاده شد. این تجهیزات در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

## ۳. نمونه مورد آزمون

برای انجام آزمایش، نمونه‌ای به‌ضخامت ۱۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. این نمونه توسط دستگاه فرز ساخته شد. برای افزایش دقت ابعادی، دو سطح مربوط به نمونه که در آزمایش به‌کار می‌روند، سنگ زده شدند. نمونه از جنس فولاد کروم - مولیبدن دار (ای. آی. اس. آی. ۴۰۴۱)

نمونه‌ای از کاربردهای این آلیاژ عبارت است از: تولید پیچ‌های دنده‌گرد، پیچ‌های دو سر رزوه، گیره فشنگی، میله‌های رابط، چرخ‌دنده‌ها، اتصالات میل‌گاردان، چرخ‌زنجیرها و میل‌لنگ‌ها [۱۱]. این قطعه بعد از تراشیده‌شدن، سنگ زده شد تا صافی سطح و توازی سطوح آن بهبود یابد.

است. این فولاد کم‌آلیاژ است و برای قطعاتی کاربرد دارد که باید آب‌دهی شوند. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۱ مشاهده می‌شود. وجود کرم در این آلیاژ سبب می‌شود که سختی‌پذیری، استحکام و مقاومت به سایش آن نسبت به فولاد معمولی بی‌شتر شود. از طرفی کرم این فولاد را در خطر تردی بازپختی قرار می‌دهد.



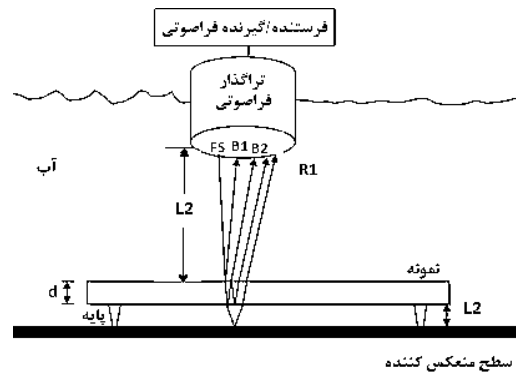
شکل ۱. چیدمان آزمون غیرمخرب به روش بازتابی و غوطه‌وری

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد ای. آی. اس. آی. ۴۰۴۱ [۱۱]

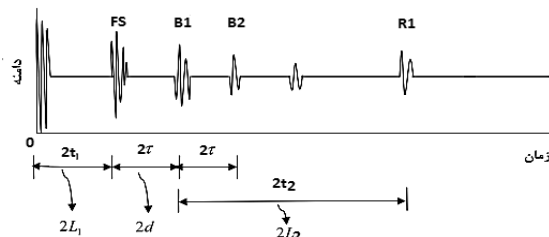
WERK-STOFE	1.7225	
SYMBOL	42CrMo4	
GROUP	Heat Treatable	
% Chemicals Composition	C	0.42
	Si	0.2
	Mn	0.75
	Cr	1
	Mo	0.25
	Ni	-
	V	-
	W	-
AISI SAE/ASTM	4140	

#### ۴. نحوه اندازه‌گیری سرعت صوت

در شکل ۲ یک آزمون فراصوتی از نوع غوطه‌وری و بازتابی مشاهده می‌شود. در این تصویر محفظهٔ پرابی مشاهده می‌شود که نمونهٔ مورد آزمایش روی سطح صافی قرار داده شده و توسط تراگذار امواجی به‌داخل قطعه ارسال می‌شود. در شکل ۳ نیز پژواک‌هایی مشاهده می‌شود که از ضخامت‌سنجی نمونهٔ مورد آزمایش در شکل ۲ به‌دست آمده‌اند.



شکل ۲. نمونهٔ مورد آزمایش به‌روش غوطه‌وری و بازتابی [۱۲]



شکل ۳. پژواک‌های به‌دست‌آمده از آزمایش شکل ۲ [۱۲]

در این تصویر  $L_1$  فاصلهٔ بین تراگذار و نمونه،  $L_2$  ارتفاع پایه‌ها،  $d$  ضخامت نمونه، پژواک حاصل از سطح جلویی نمونه<sup>۷</sup>،  $B_1$  و  $B_2$  پژواک‌های اول و دوم از دیوارهٔ پشتی<sup>۸</sup> نمونه و  $R_1$  پژواک حاصل از سطح جلویی سطح منعکس‌کننده<sup>۹</sup> هستند. با توجه به این دو شکل می‌توان معادلات ۱ تا ۳ را به‌دست آورد:

$$2t_1 = \frac{2L_1}{V_{water}} \quad (۱)$$

$$2\tau = \frac{2d}{V_{sample}} \quad (۲)$$

$$2t_2 = \frac{2L_2}{V_{water}} \quad (۳)$$

به‌طوری‌که در این معادلات  $2t_1$  تأخیر زمانی<sup>۱۰</sup> بین پژواک‌های حاصل از سطح جلویی نمونه و تراگذار،  $2\tau$  تأخیر زمانی بین سطح جلویی نمونه و پژواک بازتابیده از سطح پشتی اول و یا تأخیر زمانی بین دو اکوی متوالی بازتابیده از سطح پشتی،  $2t_2$  تأخیر زمانی بین پژواک حاصل از سطح پشتی نمونه و پژواک حاصل از سطح جلویی سطح منعکس‌کننده هستند. همچنین  $V_{sample}$  سرعت موج طولی در نمونه و  $V_{water}$  سرعت موج طولی در آب است.

#### ۵. روش معکوس تبدیل فوریه از تابع همدوسی

تابع همدوسی با استفاده از تبدیل فوریهٔ سریع سیگنال‌ها حاصل می‌شود و ارتباط خطی بین دو سیگنال را در حوزه فرکانس به‌دست می‌دهد [۶]. این تابع به‌صورت ۴ تعریف می‌شود:

$$r_{xy}^2 = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)} \leq 1 \quad (۴)$$

به‌طوری‌که در این رابطه  $G_{xy}(f)$  تابع چگالی طیف متقابل<sup>۱۱</sup> و  $G_{xx}(f)$  و  $G_{yy}(f)$  توابع چگالی خود طیف<sup>۱۲</sup> هستند. این توابع برای سیگنال‌های هم‌طول  $x(t)$  و  $y(t)$  محاسبه می‌شوند. بزرگی<sup>۱۳</sup> تابع همدوسی عددی حقیقی بین صفر و یک است. عدد یک بیانگر رابطهٔ خطی و عدد صفر نشان‌دهندهٔ مستقل بودن دو سیگنال نسبت به هم است. برای به‌دست آوردن تابع همدوسی لازم است در ابتدا توابع چگالی طیف و چگالی طیف متقابل محاسبه شوند. چگالی طیف توان<sup>۱۴</sup> با FFT تابع خودهمبستگی با توجه به رابطهٔ ۵ ارتباط دارد:

$$(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_{xx}(m) e^{-j\omega m} \quad (۵)$$

با توجه به رابطهٔ زیر می‌توان رابطهٔ ۵ را برحسب فرکانس نوشت. در این رابطه  $f_s$  فرکانس نمونه‌برداری<sup>۱۵</sup> است:

اندازه‌گیری شد. بنابراین انحراف معیار تکرار اندازه‌گیری‌ها نیز باید به‌عنوان عدم قطعیت ریزسنج در نظر گرفته شود. برای افزایش دقت، این ضخامت‌ها با دستگاه کمپراتور نوری نیز از دو طرف نمونه اندازه گرفته شد. برای حذف اثر لقی، هر ضخامت یک بار در مسیر رفت و رنیه و بار دیگر در مسیر برگشت آن (در مجموع چهار مرتبه) اندازه گرفته شد. کمپراتور نوری مورد استفاده دارای تفکیک‌پذیری ۰/۰۰۱ میلی‌متر بود. با در نظر گرفتن تفکیک‌پذیری و انحراف معیار تکرار در اندازه‌گیری، عدم قطعیت اندازه‌گیری ضخامت نمونه از رابطه ۱۰ به‌دست می‌آید [۱۳]:

$$u_d = \sqrt{S^2 + \left(\frac{R}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (10)$$

به‌طوری‌که در این رابطه S انحراف معیار و R میزان تفکیک‌پذیری است. با استفاده از معادله ۱۰ مقادیر میانگین و عدم قطعیت ضخامت‌سنجی با ریزسنج و کمپراتور نوری در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به این جدول ملاحظه می‌شود که مقادیر عدم قطعیت برای کمپراتور نوری و ریزسنج نزدیک هستند. البته این نکته را باید مد نظر قرار داد که کمپراتور لبه‌های دو طرف نمونه را می‌سنجد و ضخامت نمونه را اندازه‌گیری می‌کند. ممکن است سطوح نمونه به‌طور کامل موازی نباشند. چون ضخامت نمونه از دو طرف اندازه‌گیری می‌شود، مقادیر ضخامت که از سمت راست و چپ نمونه به‌دست می‌آیند، تفاوت دارند. با توجه به دخالت تکرار در محاسبه عدم قطعیت، نزدیکی مقادیر عدم قطعیت حاصل از اندازه‌گیری کمپراتور و ریزسنج غیرمعقول نیست.

جدول ۲. نتایج اندازه‌گیری ضخامت پله‌ها

ضخامت نمونه	
۷/۹۷۴	عدم قطعیت (میکرومتر)
۹/۸۵۴	میانگین (میلی‌متر)
۹/۶۱۷	عدم قطعیت (میکرومتر)
۹/۸۶۴	میانگین (میلی‌متر)

$$\omega = \frac{2\pi f}{f_s} \quad (6)$$

$$(f) = \frac{1}{f_s} \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_{xx}(m) e^{-j\frac{2\pi mf}{f_s}}$$

میزان ارتباط بین رشته‌های سیگنال،  $R_{xx}(m)$ ، با تبدیل فوریه معکوس زمان گسسته<sup>۱۶</sup> محاسبه می‌شود:

$$R_{xx}(m) = \int_{-\pi}^{\pi} P_{xx}(\omega) e^{j\omega m} d\omega$$

$$= \int_{-\frac{f_s}{2}}^{\frac{f_s}{2}} P_{xx}(f) e^{-j\frac{2\pi mf}{f_s}} df \quad (7)$$

در نهایت میزان CSD برای دو سیگنال به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_{xy}(\omega) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_{xy}(m) e^{-j\omega m} \quad (8)$$

به‌طوری‌که در این رابطه  $R_{xy}(m)$  برابر است با:

$$R_{xy}(m) = E[x_{n+m}y_n^*] = E[x_n y_{n-m}^*] \quad (9)$$

در این رابطه،  $-\infty < n < \infty$ ،  $E[0]$  امید ریاضی و  $x_n$  و  $y_n$  به‌ترتیب بخش‌های سیگنال‌های  $x$  و  $y$  هستند. برای به‌دست آوردن تأخیر زمانی بین دو سیگنال می‌توان بر میانگین نرمال‌شده طیف متقابل، تبدیل فوریه سریع معکوس<sup>۱۷</sup> اعمال کرد. در نتیجه تابع همبستگی متقابل دو سیگنال حاصل می‌شود. مکان بیشینه این تابع اختلاف تأخیر زمانی دو سیگنال را به دست می‌دهد.

## ۶. نتایج

برای به‌دست آوردن سرعت صوت و عدم قطعیت آن لازم است مقادیر TDOA، ضخامت نمونه و عدم قطعیت این دو را به‌دست آوریم.

### ۶-۱. اندازه‌گیری ضخامت نمونه و عدم قطعیت آن

برای اندازه‌گیری ضخامت نمونه از ریزسنج استفاده شد. ریزسنج مورد استفاده دارای تفکیک‌پذیری ۰/۰۱ میلی‌متر بود. برای ارضای شرط تکرارپذیری، هر پله پنج بار

پژواک است. با در نظر گرفتن معادله ۱۱ می‌توان سرعت موج طولی را به‌دست آورد. مقدار عدم قطعیت در محاسبه سرعت، با استفاده از همین معادله از رابطه ۱۲ به‌دست می‌آید:

$$u_v = \sqrt{c_d^2 u_d^2 + c_{TDOA}^2 u_{TDOA}^2} \quad (12)$$

به‌طوری‌که در این رابطه  $u_d$  و  $u_{TDOA}$  به‌ترتیب عدم قطعیت اندازه‌گیری ضخامت و TDOA هستند. همچنین  $c_d$  و  $c_{TDOA}$  به‌ترتیب ضریب حساسیت ضخامت و TDOA هستند که از روابط ۱۳ به‌دست می‌آیند:

$$c_d = \frac{\partial(V_{sample})}{\partial(d)} = \frac{2}{TDOA} \quad (13)$$

$$c_{TDOA} = \frac{\partial(V_{sample})}{\partial(TDOA)} = \frac{-2d}{(TDOA)^2}$$

با قراردادن معادله ۱۳ در معادله ۱۲ میزان عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت موج طولی نیز به‌دست می‌آید. به‌طور کلی مقادیر سرعت موج طولی و عدم قطعیت آن از رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$u_v = 2 \sqrt{\left(\frac{1}{TDOA}\right)^2 u_d^2 + \left(\frac{d}{(TDOA)^2}\right)^2 u_{TDOA}^2}$$

$$V_{sample} = \frac{2d}{TDOA}$$

با توجه به مقادیر TDOA، ضخامت نمونه و عدم قطعیت این دو پارامتر و استفاده از معادله ۴ مقدار سرعت موج طولی و عدم قطعیت آن به‌ترتیب برابر ۵۹۲۰ و ۲۰ متر بر ثانیه به دست آمد.

#### ۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش فراصوتی بازتابی غوطه‌وری نمونه‌ای از جنس فولاد مورد آزمون قرار گرفت. با حذف پروب‌های تماسی و استفاده از روش غوطه‌وری اثر عدم یکنواختی ماده واسط و تأثیر نیروی دست اپراتور حذف و تحلیل سیگنال‌های دریافتی از این روش، آسان‌تر شده است. در این آزمون به‌دلیل استفاده از تکرار آزمون و

با توجه به موارد ذکرشده، برای محاسبه ضخامت از میانگین ۹ بار اندازه‌گیری استفاده شد. همچنین برای محاسبه عدم قطعیت، مقدار تفکیک‌پذیری کمتر یعنی ۰/۰۱ میلی‌متر، که مربوط به ریزسنج است، در نظر گرفته شد. با این ۹ بار اندازه‌گیری، ضخامت میانگین برابر با ۹/۸۵۶ میلی‌متر و انحراف معیار ۸/۸۸۹ میکرومتر حاصل شد. بنابراین با توجه به رابطه ۱۰ میزان عدم قطعیت اندازه‌گیری ضخامت برابر با ۱۰/۸۶۱ میکرومتر خواهد بود.

#### ۶-۲. اندازه‌گیری TDOA و عدم قطعیت آن

برای اندازه‌گیری TDOA از نمونه ۵۰ مرتبه سیگنال گرفته شد. در قسمت الف از شکل ۴ یک نمونه سیگنال دریافت‌شده از نمونه مشاهده می‌شود. در قسمت ب نیز دو اکو مشاهده می‌شود که هر یک با پنجره‌ای جدا شده است، مقدار TDOA بین این دو سیگنال نیز با استفاده از روش معکوس تابع همدوسی محاسبه شده است. با حذف نقاط پرت از مقادیر محاسبه شده، میانگین و انحراف معیار TDOA به‌ترتیب برابر با ۳/۳ میکروثانیه و ۰/۵ نانوثانیه محاسبه شد. با توجه به فرکانس نمونه‌برداری ۵۰ مگاهرتز که در انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، میزان تفکیک‌پذیری در حوزه زمان نیز معکوس این مقدار و برابر ۲۰ نانوثانیه است. با در نظر گرفتن این میزان تفکیک‌پذیری و انحراف معیار اندازه‌گیری TDOA، میزان عدم قطعیت محاسبات زمانی طبق معادله ۱۰ برابر با ۱۱/۶ نانوثانیه است.

#### ۶-۳. اندازه‌گیری سرعت صوت طولی و عدم قطعیت آن

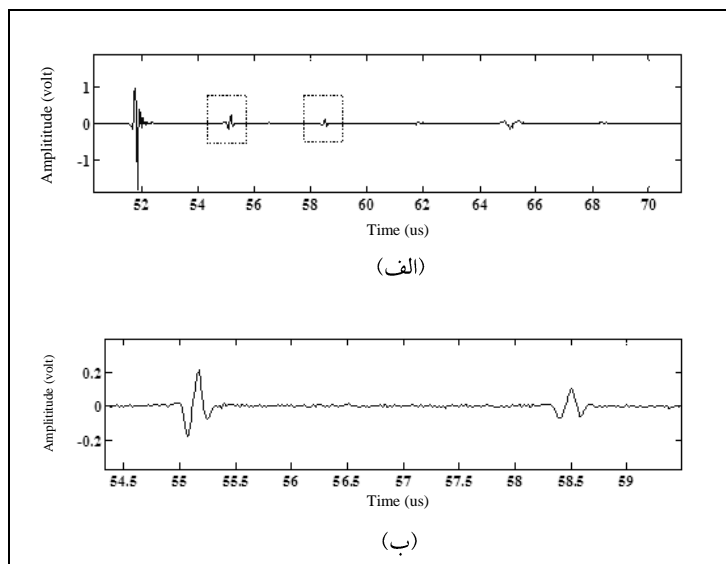
برای اندازه‌گیری سرعت صوت طولی در نمونه می‌توان نوشت:

$$V_{sample} = \frac{d}{TDOA/2} \quad (11)$$

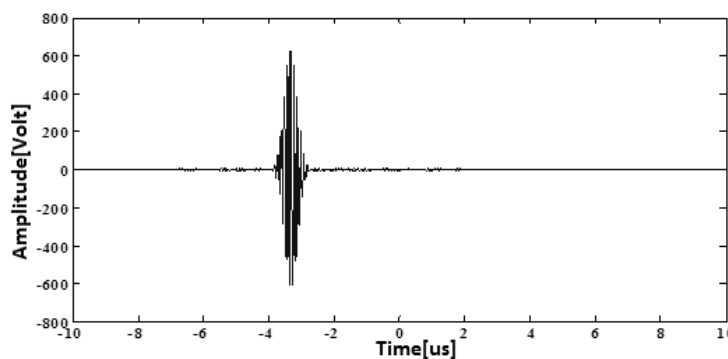
به‌طوری‌که در این رابطه  $d$  ضخامت نمونه،  $V_{sample}$  سرعت موج طولی در نمونه و TDOA اختلاف زمانی دو

گسسته‌بودن سیگنال ذخیره‌شده باعث می‌شود خطای تفکیک‌پذیری در اندازه‌گیری TDOA افزایش یابد. با وابسته در نظر گرفتن دو پژواک متوالی در اثر دادن شکل موج، دقت اندازه‌گیری TDOA افزایش یافت.

اندازه‌گیری ضخامت، دقت اندازه‌گیری سرعت صوت افزایش یافت. با استفاده از تابع همدوسی اثر نویزهای موجود در سیگنال نیز کاهش یافت. نویزهای سیگنال سبب می‌شود نقاط بیشینه پژواک‌ها کمی جابه‌جا شوند. از طرفی



شکل ۴. الف) سیگنال دریافت‌شده از نمونه، ب) بزرگنمایی سیگنال اول و دوم



شکل ۵. نتیجه حاصل از روش معکوس تبدیل فوریه تابع همدوسی حاصل از پژواک‌های نمایش داده شده در شکل ۴

## ۸. مأخذ

- [1] Mix P. E. *Introduction to non-destructive testing*, John Wiley & Sons Inc, 2005.
- [2] Mak D. K., J. Gauthier. "Ultrasonic measurement of longitudinal and shear velocities at elevated temperatures." *Ultrasonics*, vol. 31, No. 4, (1993):245-249.
- [3] Date E. H. F., M. Atkins and G. V. Beaton. "Measurement of the elasticity and ultrasound velocities of steel." *Ultrasonics*, vol. 9, No. 4, (1971): 209-214.

- [4] Rommetveit T., R. Johnsen and Q. Baltzersen. "Using Ultrasound Measurements for Realtime Process Control of Pipelines and Process Equipment Subjected to Corrosion and/or Erosion." NACE Conference Papers, New Orleans: 2008.
- [5] Schuster A. "On the investigation of hidden periodicities with application to a supposed 26 day period of meteorological phenomena." *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, vol. 3, No. 1, (1898):13-41.
- [6] Welch P. D. "The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms." *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. 15, No. 2, (1967):70-73.
- [7] Carter G. C., CH. H. Knapp and A. H. Nuttall. "Estimate of the Magnitude-Squared Coherence Function via Overlapped Fast Fourier Transform Processing." *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. 21, No. 4, (1973):337-344.
- [8] Thomson D. J. "Spectrum estimation and harmonic analysis." *Proc IEEE*, vol. 70, No. 9, (1982):1055-1096.
- [9] Rosenberg J. R., A. M. Amjad, P. Breeze, D. R. Brillinger and D. M. Halliday. "The Fourier approach to the identification of functional coupling between neuronal spike trains." *Prog. Biophys. Molec. Biol*, vol. 53, (1989):1-31.
- [10] Safri N. M., N. Murayama. "Comparison of EEG-EMG Time Delays Calculated by Phase Estimates and Inverse FFT." *Elektrika*, vol. 9, No. 2, (2007):1-7.
- [11] Search Steel, Free Search for Steel Technical Property Data, <http://www.searchsteel.com> (accessed May 9, 2012).
- [12] Chen C. H., X. Wu. "The Application of EM Algorithm to Thickness Estimation of Thin Layer Materials." *The 4<sup>th</sup> International Workshop on Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization*, UMass Dartmouth: N. Dartmouth, MA, 2006.
- [13] NASA, "Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods." *NASA Measurement Quality Assurance Handbook*, ANNEX 3, National Aeronautics and Space Administration, Washington DC: July 2010.

## پی نوشت

- 
1. ultrasonic testing (UT)
  2. transducer
  3. power spectrum
  4. periodogram
  5. windowing
  6. multitaper
  7. front surface (FS)
  8. back wall
  9. reflector surface
  10. time delay

- 
11. cross spectral density function (CSD)
  12. auto spectral density function (ASD)
  13. magnitude
  14. power spectra density (PSD)
  15. sampling frequency
  16. inverse discrete-time Fourier transform (IDTFT)
  17. inverse fast Fourier transform (IFFT)