مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 15، ص‌ص 241-248

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بهبود دقت اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی در فولاد به کمک الگوریتم SAGE

سید عباس ارحام نمازی[1]، فرهنگ هنرور[2*]

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
* تهران، صندوق پستی 1999143344، honarvar@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 28 تیر 1393
پذیرش: 04 مهر 1393
ارائه در سایت: 30 مهر 1393

کلید واژگان:
سرعت صوت
مدلسازی
آزمون فراصوتی
عدم قطعیت
الگوریتم SAGE

چکیده

اندازه‌گیری دقیق سرعت امواج فراصوتی در مواد از اهمیت زیادی برخوردار است و علاوه بر کاربردهای ضخامت‌سنجی قطعات، برای محاسبه ضرایب الاستیک مواد نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله سعی خواهد شد با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال، دقت اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی افزایش داده شده و عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت نیز محاسبه شود. بدین منظور از الگوریتم SAGE،که یکی از روش‌های تخمین به کمک مدلسازی است، استفاده شده است. به کمک این الگوریتم می‌توان اکوهای دارای همپوشانی در سیگنال فراصوتی را از هم تفکیک نمود و در نتیجه فاصله اکوها را که همان زمان پرواز موج است با دقت اندازه‌گیری کرد. علاوه بر این، با انجام مدلسازی، تأثیر نویزهای مزاحم موجود در سیگنال نیز تا حد زیادی کاهش می‌یابد. به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، نمونه‌ای پله‌ای از جنس فولاد ای‌آی‌اس‌آی 4140 با ضخامت‌های 10، 15، 20 و 25 میلی‌متر، به روش آزمون فراصوتی غوطه‌وری مورد آزمایش قرار گرفت. اختلاف زمانی بین اکوها برای پنجاه اندازه‌گیری مکرر محاسبه و با میانگین‌گیری از این مقادیر و محاسبه انحراف معیار آن‌ها مقدار اختلاف زمانی و عدم قطعیت بدست آمده است. با اندازه‌گیری دقیق ضخامت قطعه با میکرومتر و استفاده از اختلاف زمانی حاصل از مدلسازی، مقدار سرعت صوت و عدم قطعیت آن محاسبه شده است. روش‌های مختلف مدلسازی در مطالعه حاضر مورد استفاده قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که این روش می‌تواند عدم قطعیت سرعت صوت را به صورت قابل توجهی بهبود بخشد.

Improvement of Ultrasonic Wave Velocity Measurements in Steel Components by Using the SAGE Algorithm

Abbas Arhamnamazi[1], Farhang Honarvar[2*]

1- Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 1999143344 Tehran, Iran, honarvar@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 19 July 2014
Accepted 26 September 2014
Available Online 22 October 2014

Keywords:
Wave Velocity
Model-Based Estimation
Ultrasonic Testing, Uncertainty
SAGE Algorithm

ABSTRACT

Measurement of wave velocity in materials is very important .It has applications in ultrasonic thickness gauging as well as estimating the elastic constants of materials. The aim of the current paper is to improve the accuracy of wave velocity measurements by signal processing techniques. For this purpose, the SAGE algorithm, which is a model-based estimation technique, is implemented. Using SAGE, the overlapping echoes are separated and consequently the time-delay between these echoes is estimated more accurately. The signal processing scheme reduces the adverse effects of noise too. To demonstrate the effectiveness of the proposed technique, an AISI 4140 steel block with four steps of thicknesses 10, 15, 20, and 25 mm was tested by the immersion ultrasonic testing technique. The time-delay between echoes obtained from each step was measured fifty times and by averaging these measurements, the actual time-delay and its uncertainty were estimated. The thickness of the block at each step was also measured by a micrometer. Using the time-delay and thickness data, the wave velocity and its uncertainty were estimated for each of the four thicknesses. The results show that this technique can reduce the uncertainty of wave velocity measurements significantly.

1- مقدمه

آزمون فراصوتی[1] یکی از آزمون‌های غیرمخرب است که در آن از امواج فراصوتی فرکانس بالا برای بازرسی قطعات استفاده می‌شود. در این روش امواج فراصوتی توسط یک تراگذار[2] فراصوتی، وارد قطعه می‌شوند. با دریافت موج عبوری یا بازتابی و مقایسه و پردازش آن و اندازگیری ضخامت نمونه می‌توان سرعت صوت در نمونه را اندازه گرفت [1]. از سرعت صوت در موارد

1- Ultrasonic testing (UT)

2- Transducer

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
A. Arhamnamazi, F. Honarvar, Improvement of Ultrasonic Wave Velocity Measurements in Steel Components by Using the SAGE Algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 241-248, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.6.3]

مختلفی از جمله شناسایی مواد یا اندازه‌گیری خواص مکانیکی آن‌ها، مثل مدول یانگ، ضریب پواسون، و مدول برشی استفاده می‌شود.

در کاربردهایی از آزمون فراصوتی، اکوهای دریافتی با یکدیگر هم‌پوشانی دارند.با استفاده از روش دی کانولوشن[1] اکوهای دارای هم پوشانی را می‌توان از هم جدا نمود. دی‌کانولوشن، به روش‌های مختلفی انجام می‌شود که یکی از آن‌ها مدل‌سازی سیگنال مشاهده شده است. با به کارگیری روش مدل‌سازی در اندازه‌گیری زمان تأخیر، اثر نویزهای موجود در سیگنال نیز کاهش می‌یابد. نویزهای سیگنال باعث می‌شود نقاط بیشینه اکوها کمی جابه‌جا شوند.

روش SAGE[2] در سال 1994 توسط فسلر و هیرو [2] معرفی شد. این روش در سال‌های 1998 و 2001توسط دمیرلی و صنیعی [3و4] برای دیکانولوشن سیگنال‌های فراصوتی استفاده شد. این روش تعمیم یافته الگوریتم بیشینه‌سازی امید[3] است که در سال 1977 توسط دمپستر و همکاران[5] ارائه شد. در سال 2002 ابیت و همکارانش [6] بابهره‌گیری از الگوریتم SAGE توانستند ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده یک تانک سوختِ اتومبیل را اندازه‌گیری کنند. چن و وو [1] نیز از این روش برای ضخامت‌سنجی استفاده کردند. در سال 2006 لوو همکاران[7] مدل جدیدی را برای الگوریتم SAGE ارائه کردند. این مدل که چیرپلت[4] نام دارد، با سیگنال‌های حاصل از آزمون فراصوتی تطابق بهتری دارد. بر خلاف مدل گوسین، این مدل مشکل مربوط به مرتبه مدل را نداشته و نیاز به حدس اولیه نیز ندارد. لو وهمکاران در سال 2009 از این مدل برای اندازه‌گیری طول ترک موجود در نمونه آزمایشگاهی استفاده کرد [8]. او با تغییر زاویه پروب این طول را اندازه گرفت. در سال 2010 دمیرلی و صنیعی [9] مدل بهتری را برای الگوریتم SAGE ارائه کردند. آن‌ها با نامتقارن در نظر گرفتن پوش اکوی چیرپلت، توانستند مشکل عدم تطابقِ سیگنال مشاهده شده با سیگنال مدل شده را با استفاده از مدل چیرپلت بهبود بخشند. این مدل، چیرپلت گوسین نامتقارن[5] نامیده شد.

پالاچیمانی و همکاران[10] در سال 2000 با اندازه‌گیری سرعت صوت، خواص نمونه‌هایی از فولاد ضد زنگ آستنیتیِ کار سرد شده را تحت شرایط مختلف آنیل شدگی بدست آوردند. واسودوان و پالانیچامی [11] در سال 2003 با استفاده از اندازه‌گیری سرعت صوت، خواص فولاد ضد زنگ آستنیتی را تحت شرایط مختلف پیرسازی بدست آوردند. جاکویوس و همکاران [12] در سال 2006 از سرعت صوت برای اندازه‌گیری ضخامت قطعات استفاده کردند. مازیکا و همکاران [13] در سال 2010 با اندازه‌گیری سرعت صوت تحت تغییرات فرکانس موج ارسالی و ضخامت‌های مختلف، به بررسی میرایی امواج فراصوتی پرداختند. تاریگ و همکاران [14] در سال 2010 با استفاده از آزمون غیرمخرب خواص آلیاژ سری 2ایکس‌ایکس‌ایکس[6] را اندازه‌گرفتند. یکی از خواص مورد نظر آن‌ها سرعت امواج طولی در آلومینیوم بود. حمیدنیا و همکاران [15] در سال 2012، با استفاده از آزمون غیرمخرب فراصوتی، سرعت صوت را در نمونه‌ای از فولاد بازپخت‌شده اندازه گرفتند.

با توجه به منابع موجود، تا کنون در زمینه آزمون غیرمخرب، به محاسبه عدم قطعیتِ اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی پرداخته نشده است. بدین دلیل در این تحقیق با استفاده از روش SAGE، نمونه‌ای از جنس فولاد 4140 ای‌آی‌اس‌آی[7]، با چهار پله به ضخامت‌های 10، 15، 20 و 25 میلی‌متر مورد آزمایش قرار می‌گیرد. اختلاف زمانی بین اکوها برای پنجاه اندازه‌گیری مکرر محاسبه و با میانگین‌گیری از این مقادیر و محاسبه انحراف معیار آن‌ها مقدار اختلاف زمانی و عدم قطعیت بدست خواهد آمد. با اندازه‌گیری دقیق ضخامت قطعه و اختلاف زمانی حاصل از مدلسازی و عدم قطعیت هر یک این مقادیر، مقدار سرعت صوت و عدم قطعیت آن محاسبه خواهد شد.

2- روش تحقیق

2-1- تجهیزات

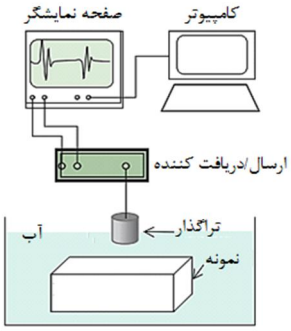
برای اندازه‌گیری سرعت موج طولی، آزمون فراصوتی بازتابی به روش غوطه‌وری انجام شده است. پروب مورد استفاده برای انجام این آزمایش، پروب موج طولی غوطه‌وری با فرکانس10مگاهرتزاست. از یک دستگاه فرستنده و گیرنده فراصوتی مدل 5072 پی‌آر از محصولات شرکت اولیمپوس[8] و یک کارت آنالوگ به دیجیتال[9] با فرکانس نمونه‌برداری 100 مگاهرتز و قابلیت تفکیک‌پذیری14بیت برای تبدیل سیگنال‌های آنالوگ به دیجیتال استفاده شده است. این تجهیزات در شکل 1 نشان داده شده‌اند.

2-2- نمونه مورد آزمایش

برای انجام آزمایش نمونه‌ای پله‌ای با ضخامت‌های 10، 15، 20 و 25 میلی‌متر، مطابق شکل 2، مورد استفاده قرار گرفته است. نمونه از جنس فولاد کروم- مولیبدن‌دار (4140ای‌آی‌اس‌آی) است. این فولاد کم‌آلیاژ بوده و برای قطعاتی کاربرد دارد که باید آب‌دهی شوند. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول1 داده شده است. وجود کرم در این آلیاژ باعث 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. نمونه‌ای از کاربردهای این آلیاژ عبارتند از: پیچ‌های دنده گرد، پیچ‌های دو سر رزوه، گیره فشنگی، میله‌های رابط، چرخ‌دنده‌ها، اتصالات میل گاردان، چرخ زنجیرها و میل لنگ‌ها [16]. این قطعه بعد از تراشیده شدن، سنگ زده شد تا صافی سطح و توازی سطوح آن بهبود یابد.

2-3- روش اندازه‌گیری سرعت صوت

در شکل 3 الف یک آزمون فراصوتی از نوع غوطه‌وری و بازتابی نشان داده شده است. در این تصویر محفظه پر آبی مشاهده می‌شود که در آن نمونه مورد آزمایش روی سطح صافی قرار داده شده و توسط تراگذار امواجی



شکل 1 چیدمان آزمون غیرمخرب به روش بازتابی و غوطه‌وری.

1- Deconvolution
2- Space Alternating Generalized Expectation Maximization (SAGE)
3- Expectation Maximization (EM)
4- Chirplet
5- Asymmetric Chirplet Gaussian (ACG)
6- 2xxx
7- AISI
8- OLYMPUS
9- A/D

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.6.3]

به داخل قطعه ارسال می‌شود. در شکل 3 ب اکوهایی مشاهده می‌شود که از ضخامت‌سنجی نمونه مورد آزمایش در شکل 3 الف به دست آمده‌اند. در این تصویر L_1 فاصله بین تراگذار و نمونه، d ضخامت نمونه، FS اکوی حاصل از سطح جلویی نمونه[1]، B_1 و B_2 اکوهای اول و دوم بازتاب از سطح پشتی[2] نمونه هستند. با توجه به دو شکل نشان داده شده، می‌توان روابط (1)و (2) را بدست آورد:

$$2t_1 = \frac{2L_1}{V_{\text{water}}} \quad (1)$$

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

در روابط (1)و (2) $2t_1$ تأخیر زمانی[3] بین اکوهای حاصل از سطح جلویی نمونه و تراگذار، 2τ تأخیر زمانی بین سطح جلویی نمونه و اکوی بازتابیده از سطح پشتی اول و یا تأخیر زمانی بین دو اکوی متوالیِ بازتابیده از سطح پشتی است. همچنین V_{sample} سرعت موج طولی در نمونه و V_{water} سرعت موج طولی در آب است.

2-4- مدلسازی با استفاده از الگوریتم SAGE

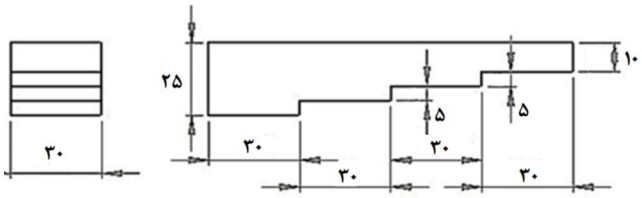
اکوی ضربه تراگذار، برای مدل‌سازی اکوهای بازتابیده تابع مبنا است. طیف فرکانسی این اکو با تقریب مناسبی گوسی شکل است. مرکز این طیف نزدیک به فرکانس مرکزی تراگذار بوده و طیف بر روی محدوده فرکانسی که با پهنای باند تراگذار تعیین شده، گسترده است. نمایش حوزه زمان طیف که معادل پاسخ ضربه تراگذار است به صورت رابطه(3) نمایش داده می‌شود [3]:

$$S(t) = \mathrm{e}^{-\alpha_T t^2}\cos(2\pi f_T t) \quad (3)$$

در این معادله f_T فرکانس مرکزی تراگذار و α_T فاکتور پهنای باند است. با استفاده از مدل ایده‌آل تراگذار برای اندازه‌گیری فراصوتی، اکوهای بازتابیده از یک سطحِ مسطح به صورت رابطه(4) مدل می‌شوند [3]:

$$x(\theta,t) = \beta e^{-\alpha(t-\tau)^2}\cos[2\pi f_c(t-\tau)+\varphi]$$
$$\theta = (\alpha,\tau,f_c,\varphi,\beta) \quad (4)$$

از آنجایی که شکل پوش[4] این اکو گوسی شکل است، این مدل به مدل اکوی گوسین معروف است. در این معادلات α پهنای باند بر حسب مگاهرتز به توان دو، τ تأخیر زمانی، f_c فرکانس مرکزی تراگذار بر حسب مگاهرتز، φ فاز بر حسب رادیان و β دامنه اکو است. این پارامترها دارای مفاهیم معینی

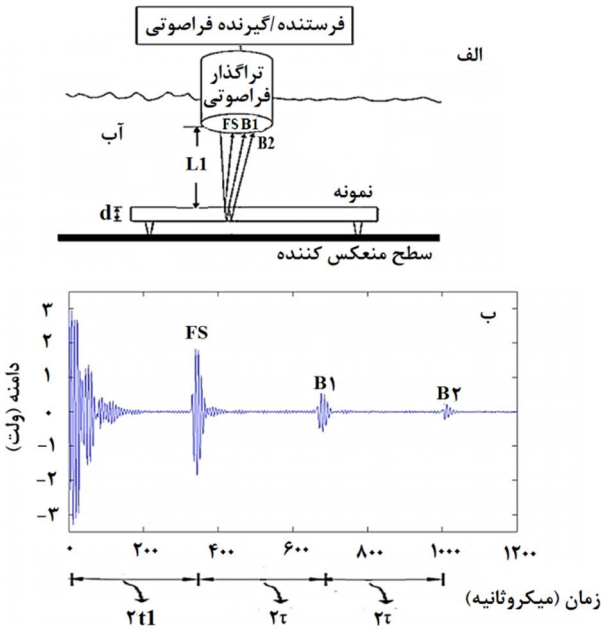


شکل 2 نقشه نمونه مورد آزمایش. (ابعاد بر حسب میلی‌متر هستند)

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد AISI 4140 [16].

نماد	ترکیب شیمیایی %					AISI SAE/ASTM
	Mo	Cr	Mn	Si	C	
42CrMo4	0/25	1/0	0/75	0/2	0/42	4140

1- Front Surface (FS)
2- Back Wall
3- Time Delay
4- Envelope



شکل 3 الف) نمونه مورد آزمایش به روش بازتابی غوطه‌وری، ب) سیگنال بدست آمده

برای بازتابنده مسطح در یک مسیر انتشار یکنواخت موج هستند. در این معادله پارامتر تأخیر زمانی به موقعیت بازتابنده مربوط می‌شود و با معلوم بودن سرعت موج صوتی در مسیر انتشار، فاصله بازتابنده تا تراگذار بدست می‌آید. پهنای باند نشان دهنده پهنای باند اکو است. به عبارتی دیگر دوره زمانی اکو را در حوزه زمان نشان می‌دهد. فرکانس مرکزی اکو همان فرکانس مرکزی تراگذار است که روی آن حک شده است. اما در عمل این دو لزوماً مساوی نیستند. این اختلاف به ویژگی‌های فرکانسی مسیر انتشار نسبت داده می‌شود [4].

در پردازش سیگنال‌های آزمایشگاهی، لازم است این پنج پارامتر از روی اکوی ضربه تراگذار حدس زده شود. برای حدس اولیه پارامترهای β و τ می‌توان از مکان و اندازه بیشینه اکو در حوزه زمان استفاده کرد [3]. پارامتر فاز تأثیر چندانی در همگرا شدن الگوریتم ندارد. لذا برای حدس اولیه این پارامتر، عدد صفر انتخاب مناسبی است. پارامتر فرکانس مرکزی یکی از اطلاعاتی است که به ویژگی ذاتی تراگذار مورد استفاده وابسته است. این پارامتر همان فرکانس مرکزی تراگذار است. همانطور که اشاره شد با توجه به ویژگی‌های فرکانسی مسیر انتشار، f_cهمیشه با فرکانس مرکزی تراگذار برابر نیست [4]. برای حدس اولیه این پارامتر از اکوی ضربه تراگذار تبدیل فوریه سریع گرفته می‌شود. فرکانسی که دارای دامنه بیشینه در حوزه فرکانس است، به عنوان حدس اولیه برای f_c در نظر گرفته می‌شود. همچنین پهنای باند را نیز می‌توان از طیف انرژی به دست آورد. قسمت اعظم انرژی سیگنال پیرامون فرکانس مرکزی است. با زیاد شدن فاصله از فرکانس مرکزی، انرژی سیگنال کاهش یافته و قابل صرف نظر است. برای یک اکوی گوسی، پهنای باند 98% که شامل 98% انرژی سیگنال است از رابطه (5) بدست می‌آید[4]:

$$BW_{98\%} = 0.382\sqrt{\alpha} \quad (5)$$

معادله مدل چیرپلت گوسین به صورت رابطه (6) ودر نهایت معادله چیرپلت گوسین نامتقارن رابطه (7) بدست می‌آید[9و10]:

$$x(\theta,t) = \beta\exp[-\alpha_1(t-\tau)^2 + i(2\pi f_c(t-\tau) + \alpha_2(t-\tau)^2 + \varphi)]$$
$$\theta = (\alpha_1,\alpha_2,\tau,f_c,\varphi,\beta) \quad (6)$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.6.3]

$$x(t) = \beta.\mathrm{env}(t-\tau).\cos[2\pi f_c(t-\tau) + \Psi(t-\tau)^2 + \varphi)]$$
$$\mathrm{env}(t) = \exp[-\alpha(1 - r\tanh(mt)t^2)] \quad (7)$$

در رابطه(6) α_1 پهنای باند بر حسب مگاهرتز به توان دو، α_2 نرخ چیرپ[1]، τ تأخیر زمانی، f_c فرکانس مرکزی تراگذار بر حسب مگاهرتز، φ فاز بر حسب رادیان و β دامنه اکو هستند. این پارامترها با استفاده از تبدیل چیرپلت تخمین زده می‌شوند.

در رابطه (7) β دامنه اکو، τ تأخیر زمانی، f_c فرکانس مرکزی تراگذار بر حسب مگاهرتز، Ψ نرخ چیرپ خطی و φ فاز اکو بر حسب رادیان هستند. $\mathrm{env}(t)$ معادله پوش اکو است. در معادله پوش، α پهنای باند و r ضریبی است که درجه نامتقارن بودن پوش را کنترل می‌کند. همچنین $\tanh(mt)$ تابع تانژانت هیپربولیک از مرتبه m است. در این تابع m عددی مثبت است و به عنوان مثال می‌تواند 16 باشد[10]. این فاکتور باعث تغییر علامت r در بازه زمانی بسیار کوچک $[-\varepsilon\ \varepsilon]$ می‌شود. بنابراین تابع پوش، تابع گوسین را با دو نرخ واپاشی در دو سمت نقطه بیشینه تقریب می‌زند.(رابطه(8)) [10]:

$$\begin{cases} env(t) = exp[-\alpha(1-r)t^2] & t > \varepsilon \\ env(t) = exp[-\alpha(1+r)t^2] & t < -\varepsilon \end{cases} \quad (8)$$

رابطه(8) برای مقادیر مثبت و بسیار کوچک ε برقرار است. قبل و بعد از نقطه بیشینه، اکو می‌تواند دارای دو نرخ واپاشی[2] (پهنای باند) باشد. این دو نرخ به صورت رابطه (9) تعریف می‌شوند [9]:

$$\begin{cases} \alpha_L = \alpha(1-r) \\ \alpha_R = \alpha(1+r) \end{cases} \quad (9)$$

پارامتر r را می‌توان با استفاده از این دو پارامتر طبق رابطه (10) بدست آورد[9]:

$$r = \frac{\alpha_L - \alpha_R}{\alpha_L + \alpha_R} \quad (10)$$

همانطور که در روابط(8)، (9)و (10) مشاهده می‌شود، در شرایطی که $\alpha_L = \alpha_R = r = 0$ تابع چیرپلت گوسین نامتقارن به یک تابع گوسین متقارن تبدیل می‌شود. اکوهایی که در آزمون فراصوتی کاربرد دارند، این ویژگی را دارند که قبل از نقطه بیشینه خود، سریع افزایش می‌یابند اما بعد از این نقطه به کندی، میرا می‌شوند که با استفاده از مدل اخیر می‌توان به این ویژگی رسید. برای تخمین پارامترهای این مدل می‌توان از همان روش مدل چیرپلت استفاده کرد. تنها تفاوت این دو مدل در فاکتورهای Ψ و r است. برای حدس اولیه این دو فاکتور می‌توان از عدد صفر استفاده کرد.

2-5 روش SAGE

الگوریتم SAGE شامل تخمین امید برای هر اکو می‌باشد. این الگوریتم را می‌توان در مراحل زیر خلاصه کرد:

مرحله1:برای بردار پارامتر حدس اولیه زده $\theta^{(0)}$می‌شود.

مرحله2:شماره تکرار برابر صفر $(k = 0)$فرض می‌شوند.

مرحله3:امید اکو با توجه به انواع مدل‌ها طبق معادلات(5)،(6)یا (7) محاسبه می‌شود $(\hat{x}^{(k)})$.

مرحله4:بردار پارامتر جدید با استفاده از الگوریتم گاوس- نیوتن به شکل رابطه(11) بدست می‌آید [4].

$$\theta^{(k+1)} = \arg\theta\min[\int_{\tau_0}^{\tau_f} [\hat{x}^{(k)}(t) - g(\theta;t)]^2 dt] \quad (11)$$

در این معادله $g(\theta;t)$اکوی مشاهده شده است.

مرحله5:قرار می‌دهیم $\theta^{(k)} = \theta^{(k+1)}$.

مرحله6:معیار همگرایی بررسی می‌شود. اگر شرط همگرایی، تلرانس $> \|\theta^{(k+1)} - \theta^{(k)}\|$، برقرار باشد، به مرحله 7 و در غیر این صورت مقدار $k \to k+1$ را تنظیم کرده و به مرحله 3 باز می‌گردیم.

مرحله7:بردار پارامتر عبارتست از: θ_k

شکل 4 مراحل الگوریتم SAGE را نشان می‌دهد.جدول 2 نمونه‌ای از حدس اولیه و مقدار همگرا شده پارامترهایِ ذکر شده را برای اکوی اولیه پله اول نشان می‌دهد.

3- نتایج

برای بدست آوردن سرعت صوت و عدم قطعیت آن لازم است مقادیر اختلاف زمانی[3]، ضخامت نمونه و عدم قطعیت این دو را بدست آوریم.

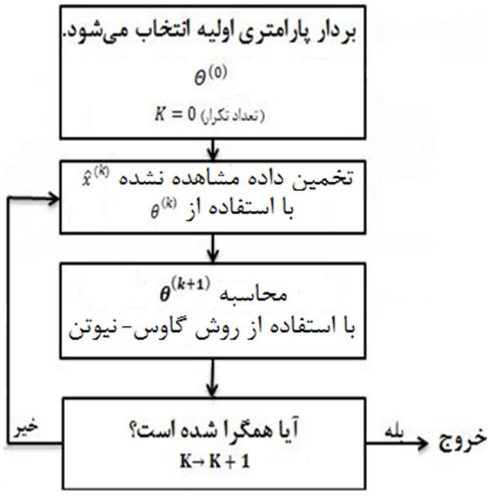
3-1- اندازه‌گیری ضخامت نمونه و عدم قطعیت آن

برای اندازه‌گیری ضخامت نمونه از میکرومتر استفاده شد. میکرومتر مورد استفاده دارای تفکیک پذیری 0/01 میلی‌متر بود. برای ارضای شرط تکرارپذیری، هر پله 5 بار اندازه گرفته شد. بنابراین انحراف معیار تکرار اندازه‌گیری‌ها نیز باید در محاسبه عدم قطعیت میکرومتر 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 ورنیه و بار دیگر در مسیر برگشت آن (مجموعا چهار مرتبه) اندازه گرفته شد. کمپراتور نوری مورد استفاده دارای تفکیک پذیری 0/001 میلی‌متر بود.

با در نظر گرفتن تفکیک پذیری و انحراف معیار تکرار در اندازه‌گیری، عدم قطعیت اندازه‌گیری ضخامت نمونه از رابطه (12) بدست می‌آید [17]، که در رابطه(12) S انحراف معیار و R میزان تفکیک پذیری است.

$$u_d = \sqrt{S^2 + \left(\frac{R}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (12)$$

قطعیت ضخامت‌سنجی با میکرومتر و کمپراتور نوری محاسبه و در جدول 3 ارائه شده است. با توجه به این جدول ملاحظه می‌شود که مقادیر عدم قطعیت برای کمپراتور نوری و میکرومتر نزدیک هستند. این نکته را نیز باید در نظر گرفت که کمپراتور لبه‌های دو طرف نمونه را سنجیده و ضخامت



شکل4:نمودارجریان الگوریتم SAGE

1- Chirp-rate
2- Decay-rate
3- Time Difference of Arrival

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.6.3]

جدول2 حدس اولیه و مقدار همگرا شده پارامترهای هر مدل با استفاده از مدل‌های گوسین ، چیرپلت گوسین و چیرپلت گوسین نامتقارن .

پارامتر	مدل گوسین		مدل چیرپلت گوسین		مدل چیرپلت گوسین نامتقارن	
	حدس اولیه	همگرا شده	حدس اولیه	همگرا شده	حدس اولیه	همگرا شده
f_c (MHz)	4/5776	4/9751	4/5776	5/0134	4/5776	4/9962
φ (rad)	0	0/4532	0	0/1209	0	0/2193
β	0/2299	0/2311	0/2299	0/2304	0/2299	0/2306
α $(\mathbf{MHz})^2$	69/721	69/784	-	-	69/721	70/000
$\boldsymbol{\alpha_1}$ $(\mathbf{MHz})^2$	-	-	69/782	69/995	-	-
$\boldsymbol{\alpha_2}$ $(\mathbf{MHz})^2$	-	-	44/7612	44/000	-	-
τ (μs)	1/3088	1/3234	1/3088	1/3120	1/3088	1/3152
r	-	-	-	-	0	0/73
$\boldsymbol{\psi}$	-	-	-	-	0	7/5517

نمونه را اندازه می‌گیرد. ممکن است سطوح نمونه به طور کامل موازی نباشند. چون ضخامت نمونه از دو طرف اندازه‌گیری می‌شود، مقادیر ضخامت که از سمت راست و چپ نمونه بدست می‌آیند، می‌توانند اختلاف داشته باشند. با توجه به دخالت تکرار در محاسبه عدم قطعیت، نزدیکی مقادیر عدم قطعیت حاصل از اندازه‌گیری کمپراتور و میکرومتر، دور از انتظار نیست.

با توجه به موارد ذکر شده، برای محاسبه ضخامت از میانگین 9 بار اندازه‌گیری استفاده شد. همچنین برای محاسبه عدم قطعیت، مقدار تفکیک پذیری کمتر یعنی 0/01 میلی‌متر که مربوط به میکرومتر است، در نظر گرفته شد و مقادیر ضخامت مطابق جدول 4 بدست آمد.

3-2- اندازه‌گیری مقادیر اختلاف زمانی و عدم قطعیت آن

برای اندازه‌گیری مقادیر اختلاف زمانی از هر ضخامت نمونه 50 مرتبه سیگنال گرفته شد. در این مرحله از روش فراصوتیِ بازتابیِ غوطه‌وری[1] استفاده شد. مزیت روش غوطه‌وری نسبت به روش تماسی[2] این است که اثر عدم یکنواختی ماده واسط و تأثیر نیروی دست اپراتور را حذف می‌کند. در شکل 5 الف یک نمونه سیگنال دریافت شده از نمونه مشاهده می‌شود. در شکل 5 ب دو اکوی اول و دوم در شکل 5 الف با پنجره‌ای جدا شده و بزرگنمایی شده‌اند.

هر یک از این دو اکو با استفاده از الگوریتم SAGE مدل‌سازی شده و مقدار مقادیر اختلاف زمانی بین این دو سیگنال نیز از اختلاف بین مقادیر τ دو اکو محاسبه شده است. در شکل 6 نمونه‌ای از اکوی مدل شده با استفاده از سه مدل گوسین[3]، چیرپلت گوسین[4] و چیرپلت گوسین نامتقارن[5]، در دو حوزه زمان و فرکانس مشاهده می‌شود. با حذف نقاط پرت از مقادیر محاسبه شده، میانگین و انحراف معیار مقادیر اختلاف زمانی برای سه روش و برای هر پله مطابق جدول 5 بدست آمد. با توجه به فرکانس نمونه‌برداری 50MHz که در انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، میزان تفکیک پذیری در حوزه زمان نیز معکوس این مقدار و برابر 20ns است. با در نظر گرفتن این میزان تفکیک پذیری و انحراف معیار اندازه‌گیری مقادیر اختلاف زمانی، میزان عدم قطعیت محاسبات زمانی طبق معادله (12) محاسبه شده است.

طبق رابطه (13) برای اندازه‌گیری سرعت صوت طولی در نمونه می‌توان نوشت:

$$V_{\text{Sample}} = \frac{d}{\text{TDOA}/2} \tag{13}$$

در رابطه(13) d ضخامت نمونه، V_{sample} سرعت موج طولی در نمونه و مقادیر اختلاف زمانی اختلاف زمانی دو اکو است. با در نظر گرفتن معادله (13) می‌توان سرعت موج طولی را بدست آورد. مقدار عدم قطعیت در محاسبه سرعت، با استفاده از همین معادله از رابطه (14) بدست می‌آید،

$$u_V = \sqrt{c_d^2 u_d^2 + c_{\text{TDOA}}^2 u_{\text{TDOA}}^2} \tag{14}$$

در این رابطه u_d و u_{TDOA} به ترتیب عدم قطعیت اندازه‌گیری ضخامت و مقادیر اختلاف زمانی هستند. همچنین c_d و c_{TDOA} به ترتیب ضریب حساسیتِ ضخامت ومقادیر اختلاف زمانی هستند که از رابطه (15) بدست می‌آیند،

$$c_d = \frac{\partial(V_{\text{Sample}})}{\partial(d)} = \frac{2}{\text{TDOA}}$$
$$c_{\text{TDOA}} = \frac{\partial(V_{\text{Sample}})}{\partial(\text{TDOA})} = \frac{-2d}{(\text{TDOA})^2} \tag{15}$$

با قرار دادن معادله (15) در معادله (14) میزان عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت موج طولی نیز بدست می‌آید. بطور کلی مقادیر سرعت موج طولی و عدم قطعیت آن از رابطه (16) بدست می‌آیند:

$$u_V = 2\sqrt{\left(\frac{1}{\text{TDOA}}\right)^2 u_d^2 + \left(\frac{d}{(\text{TDOA})^2}\right)^2 u_{\text{TDOA}}^2}$$
$$V_{\text{Sample}} = \frac{2d}{\text{TDOA}} \tag{16}$$

با توجه به مقادیر مقادیر اختلاف زمانی ، ضخامت نمونه و عدم قطعیت این دو پارامتر و با استفاده از رابطه (16)، مقدار سرعت موج طولی و عدم قطعیت آن برای سه روش و چهار پله مطابق شکل 7 بدست آمد.نتایج حاصل از شکل 7 در بخش 3-3 مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول 3 نتایج اندازه‌گیری ضخامت پله‌ها

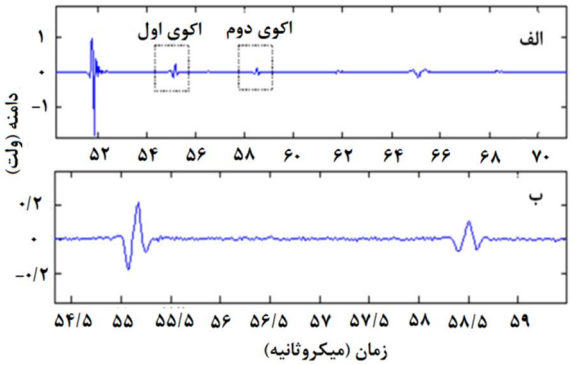
	اندازه گیری با میکرومتر		اندازه گیری با کمپراتور نوری	
	عدم قطعیت (mm)	میانگین (mm)	عدم قطعیت (mm)	میانگین (mm)
پله اول	0/01	9/85	0/010	9/864
پله دوم	0/01	14/88	0/007	14/873
پله سوم	0/01	19/89	0/001	19/909
پله چهارم	0/01	24/87	0/007	24/867

جدول 4 نتایج اندازه‌گیری ضخامت پله‌ها

	اندازه گیری با میکرومتر	
	عدم قطعیت (mm)	میانگین (mm)
پله اول	0/01	9/85
پله دوم	0/01	14/88
پله سوم	0/01	19/89
پله چهارم	0/01	24/87

1- immersion
2- contact
3- MG
4- MCG
5- MACG

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.6.3]



شکل 5 الف) سیگنال دریافت شده از نمونه، ب) بزرگنمایی اکوهای اول و دوم.

جدول 5 مقادیر مقادیر اختلاف زمانی اندازه‌گیری شده برای پله‌ها

شماره پله	اول		
روش	چیرپلت گوسین نامتقارن	چیرپلت گوسین	گوسین
میانگین (µs)	3/3270	3/3265	3/3267
انحراف معیار (ns)	0/76218	0/57906	0/98081
عدم قطعیت (ns)	11/5721	11/5615	11/5886
شماره پله		دوم	
میانگین (µs)	5/0430	5/0434	5/0420
انحراف معیار (ns)	1/3348	1/1019	2/5592
عدم قطعیت (ns)	11/6239	11/5995	11/8272
شماره پله		سوم	
میانگین (µs)	6/7425	6/7456	6/7422
انحراف معیار (ns)	1/8319	1/3013	1/1166
عدم قطعیت(ns)	11/6914	11/6201	11/6009
شماره پله		چهارم	
میانگین (µs)	8/4390	8/4377	8/4351
انحراف معیار (ns)	6/6872	3/4734	3/5413
عدم قطعیت (ns)	13/3436	12/0581	12/0788

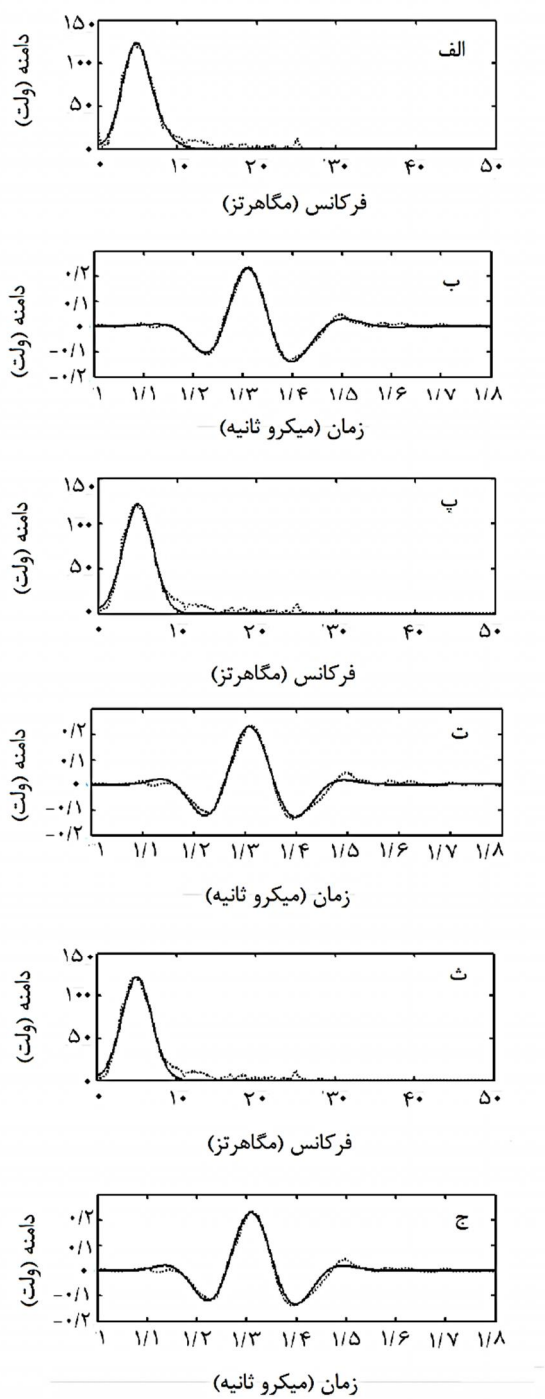
3-3- تفسیر نتایج

با توجه به نتایج بدست آمده از شکل 7 می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- در هر سه روش مقادیر سرعت صوت و عدم قطعیت بسیار نزدیک به هم هستند. این موضوع نشانگر قدرت یکسان سه روش، در کاهش اثر نویز است.
- با افزایش ضخامت قطعه از پله اول تا چهارم، میزان عدم قطعیت کاهش می‌یابد. این مطلب دور از انتظار نیست. زیرا با افزایش ضخامت پله، مقادیر اختلاف زمانی و ضخامتِ اندازه گرفته شده افزایش یافته، اما میزان خطای اندازه‌گیری آن‌ها ثابت می‌ماند. بنابراین درصد خطا کاهش می‌یابد.

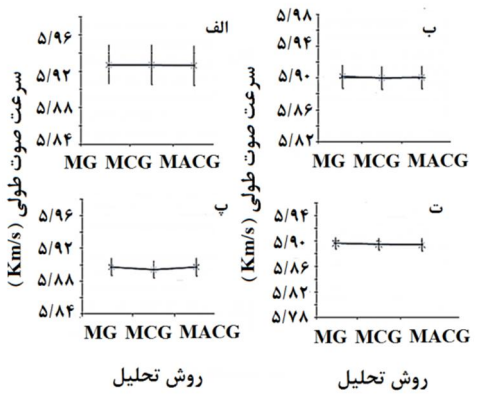
بنابراین در اندازه‌گیری سرعت صوت باید تا حد امکان از ضخامت‌های بیش‌تر استفاده شود.

- در این تحقیق توانستیم با استفاده از روش SAGE میزان تفکیک‌پذیری سیگنال‌های مشاهده شده و میزان عدم



شکل 6 سیگنال موجک تراگذارِ مدل‌شده در دو بعد فرکانس و زمان توسط الف و ب) مدل گوسین، پ و ت) مدل چیرپلت گوسین ،ث و ج) مدل چیرپلت گوسین نامتقارن. در این تصاویر منحنی‌های خط‌چین، سیگنال‌های آزمایشگاهی و منحنی‌های توپر، سیگنال‌های مدل شده هستند.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.6.3]



شکل 7 میزان سرعت صوت طولی و عدم قطعیت آن در نمونه فولادی با استفاده از سه روش مدل‌سازی برای الف) پله اول، ب) پله دوم، پ) پله سوم، ت) پله چهارم

قطعیت اندازه‌گیری اختلاف زمانی را بهبود بخشیم. البته این تنها با استفاده از روش برازش صورت گرفته است. نقاط جدید حاصل از برازش خود خطا داشته و مانع بهبود بیش‌تر نتایج می‌شوند. در صورتی که بتوان از تجهیزاتی با فرکانس نمونه‌برداری بیش‌تر استفاده کرد، می‌توان میزان عدم قطعیت را بهبود بخشید. البته در این مقاله هدف بالا بردن دقت اندازه‌گیری با استفاده از امکانات موجود بوده است.

- با توجه به میزان عدم قطعیت بدست آمده در پله چهارم که در محدوده 50 متر بر ثانیه و میزان میانگین سرعت صوت برابر 5900 متر بر ثانیه است، با نسبت گرفتن از 50 بر 5900، مقدار خطایی برابر با 0/8 درصد مشاهده می‌شود. متاسفانه در مقالات گذشته میزان عدم قطعیت صوت محاسبه نشده است. در منابعی مانند منابع11 تا 15 تنها به بیان منابع خطا پرداخته شده است. محاسبه میزان عدم قطعیت در این حوزه برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفته است که این خود از ویژگی‌های کار انجام شده است.

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش فراصوتی بازتابی غوطه‌وری نمونه‌ای از جنس فولاد مورد آزمایش قرار گرفت. با بکارگیری روش غوطه‌وری اثر عدم یکنواختی ماده واسط و تأثیر نیروی دست اپراتور حذف و تحلیل سیگنال‌های دریافتی از این روش، دقیق‌تر شده است. با به کارگیری روش مدل‌سازی در اندازه‌گیری زمان تأخیر، تأثیر نویزهای موجود در سیگنال نیز کاهش یافته است. نویزهای سیگنال باعث می‌شود نقاط بیشینه اکوها کمی جابه‌جا شوند. از طرفی گسسته بودن سیگنال ذخیره شده باعث می‌شود خطای تفکیک پذیری در اندازه‌گیری اختلاف زمانی افزایش یابد. با به کار گیری روش مدل-سازی، دقت اندازگیری اختلاف زمانی و در نتیجه دقت اندازه‌گیری سرعت صوت افزایش یافته است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که برای اندازه‌گیری سرعت صوت طولی در یک نمونه بهتر استتا حد امکان از ضخامت‌های بیش‌تر استفاده شود تا دقت افزایش یابد.

5- جدول علائم

c_d	ضریب حساسیتِ ضخامت
c_{TDOA}	ضریب حساسیتِ مقادیر اختلاف زمانی
d	ضخامت نمونه
f_c و f_T	فرکانس مرکزی تراگذار
$g(\theta;t)$	سیگنال مشاهده شده
L_1	فاصله بین تراگذار و نمونه
R	تفکیک پذیری
r	ضریب کنترل کننده درجه نامتقارن بودن پوش
S	انحراف معیار
t_1	تأخیر زمانی بین اکوهای حاصل از سطح جلویی نمونه و تراگذار
u_d	عدم قطعیت اندازه‌گیری ضخامت
u_{TDOA}	عدم قطعیت اندازه‌گیری مقادیر اختلاف زمانی
V_{water}	سرعت موج طولی در آب
V_{sample}	سرعت موج طولی در نمونه
$x(t)$	اکوی مدل شده

علایم یونانی

α و α_T و α_1	پهنای باندتراگذار
φ	فاز اکو
β	دامنه اکو
α_2	نرخ چیرپ
ψ	نرخ چیرپ خطی
α_L	نرخ واپاشی قبل از نقطه بیشینه اکو
α_R	نرخ واپاشی بعد از نقطه بیشینه اکو
τ	تأخیر زمانی بین سطح جلویی نمونه و اکوی بازتابیده از سطح پشتی اول

6- مراجع

[1] C.H. Chen and Xiaojun Wu, The Application of EM Algorithm to Thickness Estimation of Thin Layer Materials, *The 4th International Workshop on Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization, MA – Proceedings published in www.ndt.net,* 2006.

[2] J.A. Fesslor and A.O. Hero, Space Alternation Generalized Expectation Maximization Algorithm, *IEEE Trans Signal Processing,* pp.2664-2677, Vol. 42, No. 10, 1994.

[3] R. Demirli and J. Saniie, Parameter Estimation of Multiple interfering Echoes Using the SAGE Algorithm, *Ultrasonics Symposium,* pp.831-834 Vol. 1, 1998.

[4] R. Demirli and J. Saniie, Model-based Estimation of Ultrasonic Echoes, Part I: Analysis and Algorithms, *IEEE Transactions on Ultrasononics, Ferro-electrics and Frequency Control,* pp.787–802, Vol. 48, No. 3, 2001.

[5] A.P. Dempster, N.M. Laird, D.B. Rubin, Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm, *Journal of the Royal Statistical Society, Serie B (Methodological),* pp.1-38,Vol. 39, No. 1, 1977.

[6] A. Abbate, N. Nguyen, S. LaBreck, T. Nelligan, Ultrasonic Signal Processing Algorithms for The Characterization of Thin Multilayers, *NDT.net,* Vol. 7, No. 10, 2002.

[7] Y. Lu, R. Demirli, G. Cardoso and J. Saniie, "A Successive Parameter Estimation Algorithm for Chirplet Signal Decomposition," *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control,* pp. 2121 – 2131, Vol. 53, No. 11, 2006.

[8] Y. Lu, E. Oruklu and J. Saniie, Ultrasonic Chirplet Signal Decomposition for Defect Evaluation and Pattern Recognition, *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings,* Rome, Italy, pp. 2553–2556, 2009.

[9] R. Demirli and J. Saniie, Asymmetric Gaussian Chirplet Model for Ultrasonic Echo Analysis, *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, San Diego, CA, USA,*pp 124 – 128, 2010.

[10] P. Palanichamy, M. Vasudevan, T. Jayakumar, S. Venugopal, B. Raj, Ultrasonic velocity measurements for characterizing the annealing

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.6.3]

behavior of cold worked austenitic stainless steel, *NDT&E International*, Vol. 33, No. 1 , pp. 253–259, 2000.
[11]M. Vasudevan, P. Palanichamy, Assessment of microstructure stability of cold worked Ti-modified austenitic stainless steel during aging using ultrasonic velocity measurements and correlation with mechanical properties, *Nuclear Materials,* Vol.312, No. 2-3, pp. 181–190, 2003.
[12]L. Jakeviėius, J. Butkus, A. V. Auskas, Measurement of thickness of layer and sound velocity in multi-layered structure by the use of angular ultrasonic transducers, *ULTRAGARSAS*, Vol. 1, No. 58 , pp. 20–24, 2006.
[13]L. Mažeika, R. Šliteris, A. Vladišauskas, Measurement of velocity and attenuation for ultrasonic longitudinal waves in the polyethylene samples, *Nuclear Materials,* Vol. 65, No. 4, pp. 17–33, 2010.
[14]F. Tariq, N. Naz, R.A. Baloch, Characterization of Material Properties of 2xxx Series Al-Alloys by Non Destructive Testing Techniques, , *Journal of Nondestructive Evaluation,* Vol. 31, No. 1, pp. 12–15, 2010.
[15]M.Hamidnia, F. Honarvar, H.Khorsand, accurate measurement of mechanical properties of tempered microstructures of AISI D6 alloy steel by ultrasonic nondestructive method,*Modares Mechanical Engineering,* Vol. 12, No. 4, pp. 48-58, 2012. (In Persian)
[16]http://www.searchsteel.com ,accessed July 9,2012.
[17]NASA HANDBOOK, *Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods,* NASA Measurement Quality Assurance Handbook – ANNEX 3, National Aeronautics and Space Administration Washington DC 20546, July (2010).

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.6.3]