



## Behavior of Critically Refracted Longitudinal and Lamb Waves with Stress Variations in Al 1050 Sample

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Safikhlanlu H.<sup>1</sup> BSc,  
Alimirzaei S.<sup>1</sup> MSc,  
Ahmadi Najafabadi M.\*<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Safikhlanlu H, Alimirzaei S, Ahmadi Najafabadi M. Behavior of Critically Refracted Longitudinal and Lamb Waves with Stress Variations in Al 1050 Sample. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(5):1223-1234.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran  
Phone: +98 (21) 64543431  
Fax: -  
ahmadin@aut.ac.ir

#### Article History

Received: July 21, 2019  
Accepted: November 03, 2019  
ePublished: May 09, 2020

### ABSTRACT

Critically refracted longitudinal (Lcr) wave is the refraction of the longitudinal waves emitted from the first medium parallel with the surface of the second medium. The relationship between stress and wave velocity is expressed by acoustoelastic law. The theoretical relations for calculation of the acoustoelastic coefficient are so complex because of the need for measurement of material second and third-order elastic constants. The purpose of this research is the introduction of an accurate experimental method for acoustoelastic coefficient calculation, the effect of thickness of emission environment on the Lcr waves and, finally, the investigation of the stress measurement in shells and thin plates. By transmitting waves at the surface of the substance and investigating the waves received by the receiver transducers, the breakdown and the formation of different groups in the propagation of Lcr waves were detected. While the transmitted wave is composed of only one group. The results of this study show that longitudinal wave propagation in low thickness causes the formation of components of symmetrical and antisymmetric Lamb waves. By applying tensile stress on the sheet in which an Lcr wave was sent, it was determined that all groups received in the middle of the receiver transducer having a critical longitudinal nature behave identically to stress variations, while the Lamb's components behave differently to stress changes. Also, the study of variations of waves with stress less than yield point (up to 30MPa) shows that in a sample with a thickness of 0.5mm, the variations the flight time of the Lamb's S0 and A0 waves are 3.75 and 1.91 times the changes in the Lcr waves.

**Keywords** Critically Refracted Longitudinal Wave; Acoustoelastic Coefficient; Symmetric and Antisymmetric Lamb waves; Acoustoelastic

### CITATION LINKS

[1] Methods of measuring residual stresses in ... [2] The effect of post-weld heat-treatment on ... [3] The microstructure and mechanical properties of low carbon ... [4] Stress relief procedures for low carbon steel (1020) ... [5] Effects of the stress-relief conditions on a martensite ... [6] Minimisation of the residual stress in the heat affected zone ... [7] The measurement of applied and residual stresses in ... [8] Measurement of acoustoelastic and third-order elastic ... [9] Stress and yielding studies using critical refracted ... [10] Subsurface stress evaluation in steel plates and bars using the ... [11] Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding ... [12] Using ultrasonic waves and finite element method to... [13] Ultrasonic inspection of a welded stainless steel pipe to evaluate residual ... [14] Determination of residual stress using critically refracted ... [15] Ultrasonic evaluation of welding residual ... [16] Residual stress evaluation in dissimilar welded joints using finite ... [17] Nondestructive evaluation of welding residual stresses ... [18] Nondestructive evaluation of welding residual stresses ... [19] Influence of welding sequence on welding distortions ... [20] Ultrasonic measurement of hoop residual stress in stainless ... [21] Employing the waves to measure longitudinal ... [22] Nondestructive testing residual stress using ultrasonic ... [23] Stress evaluation of laser cladding coating with ... [24] Experiment and numerical simulation for laser ... [25] Laser ultrasonic technology for residual stress ... [26] Plane stress measurement of orthotropic materials using ... [27] Stress evaluation of metallic material under steady state ... [28] Absolute stress field measurement in structural steel ... [29] Influence factors analysis and accuracy improvement for stress measurement ... [30] An improved ultrasonic method for plane stress measurement using critically ... [31] Experimental characterization of material nonlinearity using Lamb ... [32] Time-frequency representations of Lamb ... [33] Effect of uniaxial stress on the propagation of higher-order Lamb ... [34] Group velocity and characteristic wave curves of Lamb waves in composites: Modeling ... [35] Higher order acoustoelastic Lamb wave propagation in stressed ...

## بررسی رفتار امواج طولی بحرانی و امواج لمب با تغییرات تنش در نمونه AI1050

حامد صفی‌خانلو BSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

سجاد علی‌میرزایی MSC

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

مهدی احمدی‌نجف‌آبادی\* PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### چکیده

موج طولی بحرانی به معنای انکسار امواج طولی گسیل‌شده از محیط اول در راستای موازی با سطح محیط دوم است. ارتباط بین تنش و سرعت موج با قانون آکوستوالاستیک بیان می‌شود. تعیین ضریب آکوستوالاستیک به کمک روابط تئوری به علت نیاز به محاسبه ثوابت الاستیک مرتبه دوم و سوم ماده بسیار مشکل است. هدف از این پژوهش ارائه روشی تجربی برای اندازه‌گیری دقیق ضریب آکوستوالاستیک، بررسی تاثیر ضخامت محیط انتشار بر امواج طولی بحرانی و در نهایت بررسی امکان اندازه‌گیری تنش در پوسته‌ها و صفحات نازک است. با ارسال موج در سطح ماده و بررسی امواج دریافت شده توسط سنسورهای گیرنده، به گسیختگی و به وجود آمدن گروه‌های مختلف در انتشار امواج طولی بحرانی پی برده شد. در حالی که موج ارسالی تنها از یک گروه تشکیل شده است. بررسی نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که انتشار موج طولی در ضخامت‌های کم سبب به وجود آمدن مولفه‌هایی از امواج لمب متقارن و نامتقارن نیز می‌شود. با اعمال تنش کششی بر ورقه‌ای که در آن موج طولی بحرانی ارسال شده است مشخص شد که تمام گروه‌هایی که توسط ترانسدویسر گیرنده دریافت می‌شوند و دارای ماهیت طولی بحرانی هستند رفتار یکسانی در مقابل تغییرات تنش دارند در حالی که مولفه‌های لمب رفتار متفاوتی در برابر تغییرات تنش از خود نشان می‌دهند. همچنین بررسی تغییرات زمان انتشار امواج با تغییرات تنش‌های کمتر از حد الاستیک نشان می‌دهد که در نمونه‌ای با ضخامت ۵/۵ میلی‌متر، تغییرات زمان پرواز امواج لمب  $S_0$  و  $A_0$ ، به ترتیب ۳/۷۵ و ۱/۹۱ برابر تغییرات امواج طولی بحرانی است.

**کلیدواژه‌ها:** امواج طولی بحرانی، ضریب آکوستوالاستیک، امواج لمب متقارن و نامتقارن، آکوستوالاستیک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۲

\* نویسنده مسئول: ahmadin@aut.ac.ir

### ۱- مقدمه

فراصوت یکی از مهم‌ترین روش‌های عیب‌یابی در قطعات محسوب می‌شود. کاربرد مهم دیگر امواج فراصوت اندازه‌گیری تنش در قطعات صنعتی است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در قطعات وجود دارد، که می‌توان آنها را به سه روش مخرب، نیمه‌مخرب و غیرمخرب تقسیم‌بندی کرد [1]. روش‌های مخرب و نیمه‌مخرب بیشتر به‌عنوان روش‌های مکانیکی شناخته می‌شوند. در روش‌های مخرب مانند روش شیارزنی برای ارزیابی تنش پسماند، قطعه مورد بررسی دچار تخریب می‌شود. در حالی که در روش‌های نیمه‌مخرب همانند روش سوراخ‌کاری،

قطعه دچار آسیب جزئی می‌شود [2-6]. در روش‌های غیرمخرب همانند روش پرتو ایکس، پرتو نوترون و فراصوت برخی پارامترها اندازه‌گیری می‌شود و با کالیبراسیون این پارامترها مولفه‌های تنش به دست می‌آید. اندازه‌گیری تنش با فراصوت بر پایه رابطه خطی بین سرعت امواج فراصوت و تنش اعمال شده بنا شده است. این خاصیت در واقع بیان‌کننده تاثیر ضرایب آکوستوالاستیک با تغییرات زمان پرواز موج با اعمال تنش است. در سال ۱۹۶۷ نتایج پژوهش کریکرفت [7] نشان داد که قانون آکوستوالاستیک می‌تواند برای اندازه‌گیری تنش در قطعات مهندسی مورد استفاده قرار گیرد. امواج بحرانی طولی (Longitudinal Critically Refracted: LCR) امواج فراصوت هستند که موازی با سطح قطعه منتشر می‌شوند. ایگل و بری [8] نشان دادند که در میان امواج فراصوت، امواج بحرانی طولی حساسیت بیشتری به تنش در قطعه دارند. تانگ و بری [9] از امواج طولی بحرانی برای اندازه‌گیری تنش در قطعات استفاده کردند. آنها در پژوهش خود تغییرات سرعت امواج را تحت محدوده تنش منجر به تغییر شکل پلاستیک مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. در پژوهشی دیگر تانگ و بری [10] از امواج طولی بحرانی برای ارزیابی تنش‌های خمشی در تیرها و صفحات فلزی استفاده کردند و نفوذ امواج فراصوت را در عمق قطعه مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش‌های جواد و همکاران [11] و صادقی و همکاران [12] نشان داد که از امواج فراصوت می‌توان برای اندازه‌گیری تنش در عمق قطعات فولادی و آلومینیومی استفاده کرد. همچنین در پژوهشی دیگر جواد و همکاران [13] از امواج طولی بحرانی برای تعیین تنش‌های مماسی و طولی در جداره لوله‌ها استفاده کردند. بلاسن و لو [14] با استفاده از تنش‌های طولی بحرانی تنش‌های پسماند به‌وجودآمده در صفحات جوشکاری شده را مورد مطالعه قرار دادند. اخیرا استفاده از امواج طولی بحرانی برای اندازه‌گیری تنش بسیار متداول شده است و در صنایع مختلف کاربرد دارد [15-21]. ژو و همکاران [22] از امواج طولی بحرانی برای اندازه‌گیری تنش در چرخ‌دنده‌ها، لوله‌های جوشکاری شده و شفت‌ها استفاده کردند. لیو و دانگ [23] با استفاده از امواج طولی بحرانی تنش را در قطعات پوشش‌دهی شده با لیزر بررسی کردند. ژان و همکاران [24, 25] روش تجربی و المان محدود جدیدی را برای اندازه‌گیری ضریب آکوستوالاستیک ارائه دادند و تنش پسماند در جوش را با استفاده از دستگاه فراصوت لیزری اندازه‌گیری کردند. همچنین وانگ و همکاران [26] روش‌های فراصوت جدید و بهبودیافته‌ای را براساس تضعیف سرعت امواج طولی بحرانی برای اندازه‌گیری تنش در مواد اورتوتروپیک ارائه دادند. مائو و همکاران [27] به اندازه‌گیری تنش در نمونه‌های فلزی با استفاده از امواج فراصوت غیرخطی پرداختند. هی و همکاران [28] از امواج طولی بحرانی برای مشخص کردن میدان تنش در فولادها استفاده کردند. لیو و همکاران [29] اثر دما و کوپلنت را در اندازه‌گیری تنش با استفاده از امواج فراصوت بررسی کردند.

سفتی معادل و  $\lambda$  تانسور تنش کوشی است. در صورتی که ماده همسانگرد بوده و تغییر شکل همگن باشد، معادله سرعت انتشار موج برحسب تنش به صورت رابطه (۴) ساده می‌شود [22]:

$$\rho V^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma}{3\lambda+2\mu} \left[ \frac{\lambda+2\mu}{\mu} (4\lambda + 10\mu + 4m) + \lambda + 2l \right] \quad (4)$$

در رابطه ۴،  $V$  سرعت امواج طولی در ماده تحت تنش،  $\lambda$  و  $\mu$  ثوابت لامه (Lame) و  $l$  و  $m$  ثوابت مرناگان (Murnaghan) است. قابل ذکر است که در رابطه (۴)، امواج طولی هم‌جهت با تنش  $\sigma$  بوده و  $\sigma$  به‌ازای تنش‌های کششی با علامت مثبت و برعکس به‌ازای تنش‌های فشاری با علامت منفی در معادله قرار داده می‌شود. رابطه (۴) بیانگر وجود یک رابطه مستقیم بین تنش در یک ماده با سرعت امواج فراصوت است.

### ۳-۲- ضریب آکوستوالاستیک

در صورتی که در نمونه مورد مطالعه از اعمال تنش‌های خارجی صرف‌نظر شود، سرعت انتشار امواج طولی فراصوت به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$V_0^2 = \frac{\lambda+2\mu}{\rho} \quad (5)$$

در رابطه فوق،  $V_0$  سرعت امواج طولی فراصوت در قطعه در حالت بدون تنش است. با در نظرگرفتن روابط (۴) و (۵) رابطه تنش با سرعت امواج فراصوت به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$k\sigma = \left( 1 - \frac{V^2}{V_0^2} \right) \quad (6)$$

در رابطه (۶) ضریب  $k$  ضریب آکوستوالاستیک نامیده می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k = - \frac{\frac{4\lambda+10\mu+4m}{\mu} + \frac{\lambda+2l}{\lambda+2\mu}}{3\lambda+2\mu} \quad (7)$$

رابطه (۷) نشان می‌دهد که ضریب آکوستوالاستیک، تنها به ثوابت الاستیک مرتبه دوم (لامه) و مرتبه سوم (مرناگان) ماده وابسته است. بنابراین با معلوم‌بودن ضرایب الاستیک مرتبه دو و سه، با استفاده از رابطه (۶) می‌توان ضریب آکوستوالاستیک و نهایتاً سرعت امواج فراصوت را در هر تنش اعمالی بر قطعه محاسبه کرد.

### ۴-۲- روش‌های محاسبه ضریب آکوستوالاستیک

روش‌های محاسبه ضریب آکوستوالاستیک به سه دسته تئوری، عددی و تجربی تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش تئوری و عددی ابتدا باید ثوابت الاستیک ماده مورد نظر را محاسبه نمود، سپس با استفاده از روابط تئوری یا نرم‌افزار (همانند نرم‌افزار آباکوس) ضریب آکوستوالاستیک را به‌دست آورد [22, 24]. استفاده از دو روش تئوری و عددی به‌دلیل نیاز به اندازه‌گیری ثوابت الاستیک ماده محدود و پیچیده است. در این پژوهش از روش تجربی برای محاسبه ضریب آکوستوالاستیک استفاده می‌شود که در بخش ۳ به‌طور مفصل به آن پرداخته شده است.

### ۵-۲- رابطه بین تنش و زمان پرواز موج

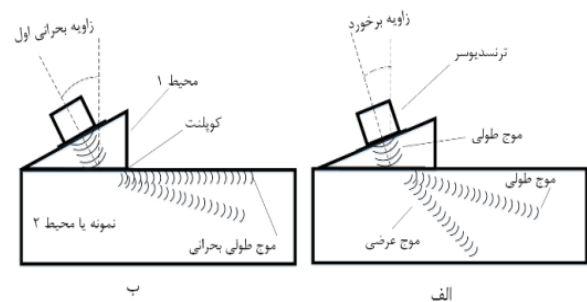
مهم‌ترین مشکل استفاده از رابطه (۷)، محاسبه ثوابت الاستیک مرتبه دوم و سوم ماده است. لذا رابطه (۶) بدون محاسبه ضریب آکوستوالاستیک غیرقابل استفاده است، بنابراین ارایه روشی

در تمام روش‌های اندازه‌گیری تنش با امواج فراصوت، اندازه‌گیری دقیق ضریب آکوستوالاستیک ضروری است. اندازه‌گیری ضریب آکوستوالاستیک با روش‌های تئوری و عددی به‌علت نیاز به محاسبه ضرایب مرتبه دوم و سوم الاستیک ماده بسیار پیچیده است. در مقطعی همانند پوسته‌های جدار نازک و صفحات کم ضخامت در فرکانس‌های پایین موج، امواج طولی بحرانی به امواج لمب متقارن یا نامتقارن تبدیل می‌شوند. هدف از این پژوهش ارایه روش تجربی ساده و دقیق برای محاسبه ضریب آکوستوالاستیک، بررسی رفتار امواج لمب در مقایسه با امواج طولی بحرانی و در نهایت بررسی امکان اندازه‌گیری تنش در پوسته‌ها و صفحات نازک با استفاده از امواج لمب است.

### ۲- روابط تحلیلی

#### ۲-۱- امواج طولی بحرانی

در شکل ۱ شماتیکی از قانون اسنل و انکسار امواج طولی بحرانی نشان داده شده است [30].



شکل ۱ شماتیکی از قانون اسنل (الف) و امواج طولی بحرانی (ب)

قابل ذکر است که زاویه بحرانی اول مطابق رابطه ۱ از قانون اسنل محاسبه می‌شود:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $\theta_1$  و  $\theta_2$  به ترتیب زاویه برخورد با محیط اول و دوم و  $V_1$  و  $V_2$  به ترتیب سرعت امواج در محیط اول و دوم هستند. در هنگام تشکیل زاویه بحرانی اول  $\theta_2$  برابر ۹۰ درجه بوده و به این ترتیب زاویه بحرانی اول طبق رابطه (۲) به‌دست می‌آید [30].

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (2)$$

که در رابطه فوق،  $\theta_c$  زاویه بحرانی اول است.

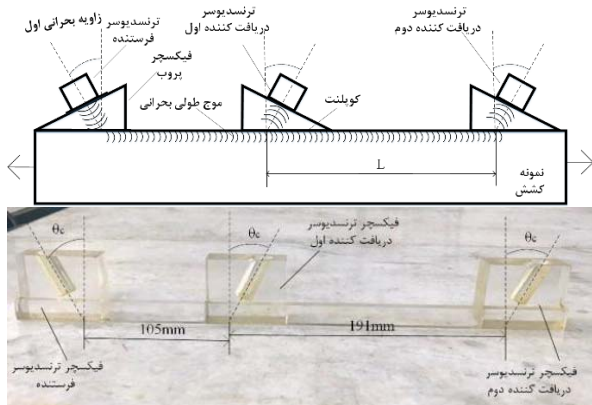
### ۲-۲- نظریه آکوستوالاستیک

نظریه آکوستوالاستیک بیانگر رابطه بین تنش الاستیک در یک محیط با سرعت امواج در آن محیط است. براساس قانون آکوستوالاستیک، معادله امواج در محیط تحت تنش از رابطه (۳) به‌دست می‌آید [22]:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\delta_{ik} t_{jl}^i + C_{ijkl}) \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right] = \rho^i \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $\delta_{ik}$  تابع دلتای کرونکر،  $\rho^i$  چگالی محیط تحت شرایط بارگذاری،  $u_i$  جابجایی دینامیکی،  $X_j$  بردار مکان ذره،  $C_{ijkl}$

برای بررسی تجربی اندازه‌گیری ضریب آکوستوالاستیک بعد از محاسبه سرعت موج در نمونه‌های آلومینیوم و پلی‌متیل متاکریلات (Poly Methyl Methacrylate) اندازه زاویه بحرانی طبق رابطه (۲) محاسبه شده و در نهایت فیکسچر پروپ‌ها طراحی و ساخته می‌شوند (مطابق شکل ۲-ب).



شکل ۲ الف شماتیکی از نحوه اندازه‌گیری ضریب آکوستوالاستیک، ب فیکسچر پروپ‌ها

همچنین قابل ذکر است که، با توجه به کمبود تغییرات زمان پرواز موج نسبت به تغییرات تنش به‌منظور مشاهده بهتر تغییرات زمان پرواز موج فاصله سنسگرها باید تا حد امکان زیاد در نظر گرفته شود.

به‌منظور تشکیل امواج طولی بحرانی در نمونه کشش، زاویه برخورد موج با سطح نمونه کشش باید برابر با زاویه بحرانی اول باشد. زاویه برخورد موج توسط فیکسچر پروپ‌ها تنظیم می‌شود. برای محاسبه زاویه بحرانی ابتدا سرعت امواج فراصوت در نمونه و فیکسچر محاسبه می‌شود. با توجه به طول نمونه مورد آزمایش فاصله دو سنسگر دریافت‌کننده از همدیگر ۱۹۱ میلی‌متر بوده و فاصله سنسگر فرستنده از سنسگر دریافت‌کننده اول ۱۰۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد (شکل ۲-ب). در این پژوهش سرعت امواج طولی فراصوت در نمونه آلومینیومی ۱۰۵۰ و پلی‌متیل متاکریلات، به‌ترتیب برابر با ۶۴۴۶ و ۲۷۰۹ متر بر ثانیه است.

در این پژوهش با توجه به رابطه ۱۲، زاویه بحرانی اول  $24^{\circ}51'$  درجه به‌دست می‌آید. برای بررسی رفتار امواج طولی بحرانی، نمونه کششی با ابعاد  $50 \times 33/3 \times 5$  میلی‌متر مطابق شکل ۳-الف ساخته می‌شود. دلیل استفاده از نمونه‌ای با طول زیاد در این آزمون، کاهش خطای قرابت تغییرات زمان پرواز موج نسبت به تنش اعمالی است. بررسی‌های تحلیلی بیانگر تشکیل امواج لمب در  $f \times t$  های پایین است [31-33]. امواج لمب در قطعاتی با ضخامت کم تشکیل شده و به‌صورت دو مد متقارن و پادمقارن منتشر می‌شوند. بنابراین شرط تبدیل امواج ریلی به امواج لمب، کم‌تر بودن ضخامت قطعه نسبت به طول موج امواج ارسالی به نمونه است و معمولاً در فرکانس‌های کم این اتفاق می‌افتد [34]. برای بررسی رفتار امواج لمب در نمونه آلومینیومی، ضخامت نمونه

تجربی برای محاسبه ضریب آکوستوالاستیک بسیار ضروری است. با توجه به اینکه فاصله بین دو سنسگر فرستنده و گیرنده امواج ثابت است و سرعت موج فراصوت با تقسیم زمان پرواز موج به فاصله بین دو سنسگر محاسبه می‌شود، داریم:

$$V = \frac{L}{t} \quad \& \quad V_0 = \frac{L}{t_0} \quad (8)$$

در فوق،  $L$  فاصله بین دو سنسگر،  $t_0$  زمان پرواز موج در حالت بدون تنش و  $t$  زمان پرواز موج در حالت اعمال تنش است. با جایگذاری روابط (۸)، در رابطه (۶)، رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\sigma = \frac{1}{k} \left( 1 - \frac{t_0^2}{t^2} \right) \quad (9)$$

با بسط تیلور عبارت داخل پرانتز در رابطه (۶) به‌صورت زیر ساده می‌شود:

$$1 - \frac{t_0^2}{t^2} = \frac{2t_0^2}{t^3} (t - t_0) \quad (10)$$

با جایگذاری رابطه (۱۰) در رابطه (۹)، رابطه تنش به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\sigma = \frac{2t_0^2}{kt^3} (\Delta t) \quad (11)$$

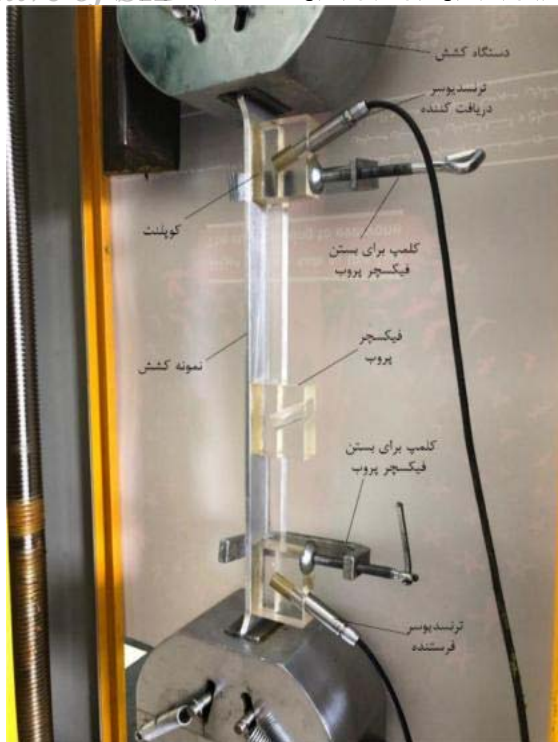
قابل ذکر است که، تغییرات زمان پرواز موج با تنش  $(\Delta t)$  بسیار کم بوده و در صورتی که  $t = t_0 + \Delta t$  باشد، رابطه (۱۱) به‌صورت زیر ساده می‌شود:

$$\sigma = \frac{2}{kt_0} (\Delta t) = M(\Delta t) \quad (12)$$

رابطه (۱۲) بیانگر وجود رابطه خطی بین تنش اعمال شده بر قطعه و تغییرات زمان پرواز موج است. همچنین این رابطه نشان می‌دهد که برای محاسبه تنش اعمال شده به قطعه، نیازی به محاسبه ثابت الاستیک مرتبه دوم و سوم ماده نیست و با کالیبره کردن تغییرات تنش برحسب تغییرات زمان پرواز موج، ضریب آکوستوالاستیک به‌دست می‌آید. بعد از محاسبه ضریب آکوستوالاستیک از رابطه (۱۲) برای محاسبه تنش در قطعات مختلف استفاده می‌شود.

### ۳- فرآیند تجربی

برای محاسبه ضریب آکوستوالاستیک، نمونه کشش و فیکسچری برای تنظیم پروپ‌ها با زاویه بحرانی اول طراحی و ساخته می‌شود. سپس مطابق شکل ۲-الف نمونه کشش را در نیروهای مختلف تحت تنش قرار داده و زمان پرواز موج خوانده می‌شود. در نهایت با استفاده از رابطه (۱۲) ضریب آکوستوالاستیک محاسبه می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که، در رابطه (۱۲) برای حذف اثرات ناشی از فیکسچرها در زمان پرواز موج بدون تنش  $(t_0)$ ، از دو سنسگر گیرنده استفاده می‌شود. به این ترتیب موج توسط سنسگر فرستنده ارسال شده و سپس در یک تنش ثابت توسط سنسگرهای دریافت‌کننده اول و دوم دریافت می‌شود و زمان پرواز موج در تنش‌های مختلف با استفاده از دو سنسگر گیرنده به‌دست می‌آید. ذکر این نکته در اینجا قابل ذکر است که قطر پروپ‌ها مورد استفاده برای این آزمایش ۱۳ میلی‌متر، فرکانس پروپ‌ها ۲/۵ مگاهرتز و فرکانس نمونه‌برداری ۵۰ مگاهرتز است.



شکل ۴) آزمایش تجربی برای اندازه‌گیری ضریب آکوستوالاستیک

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

##### ۴-۱- بررسی رفتار امواج طولی بحرانی با تغییرات تنش

برای بررسی رفتار امواج طولی بحرانی در برابر تغییرات تنش، نمونه کششی با ضخامت زیاد، در تنش‌های مختلف تحت بارگذاری قرار می‌گیرد و در هر تنش ثابت، سنسگر فرستنده موج طولی را ارسال کرده و بعد از تبدیل این موج طولی به موج طولی بحرانی، توسط سنسگر گیرنده دریافت شده و زمان پرواز موج محاسبه می‌شود. در نمودار ۱- الف امواج دریافت شده توسط سنسگر دریافت‌کننده نشان داده شده است. همان طور که از شکل فوق قابل مشاهده است، امواج دریافت شده توسط سنسگر گیرنده، از گروه‌های مختلف موج تشکیل شده است که مطابق با نمودار ۱- ب هر گروه متشکل از تعداد زیادی موج است. دلیل مشاهده امواج زیاد در هر گروه، انکسار امواج طولی به امواج طولی و عرضی و انعکاس موج از لبه‌های نمونه کشش است.

در نمودار ۲ تغییرات یکی از امواج گروه ۱ در تنش‌های مختلف (دریافت شده توسط سنسگر گیرنده اول) نشان داده شده است. همان طور که از منحنی‌های فوق مشاهده می‌شود، دقت دستگاه فراصوت ۰/۱ میکروثانیه است، در حالی که تغییرات زمان پرواز موج در تنش‌های پایین، کمتر از دقت مورد نظر و در حدود نانوثانیه بوده و تغییرات به خوبی توسط نرم‌افزار فراصوت قابل مشاهده هستند. برای حل مشکل فوق موج مورد بررسی توسط نرم‌افزار فراصوت بزرگ‌نمایی شد و سپس توسط یکی از نرم‌افزارهای داده‌برداری از نمودار تغییرات زمان پرواز موج با دقت ۰/۱ نانوثانیه (۱۰۰۰ مرتبه بهتر از دقت دستگاه فراصوت) به دست می‌آید.

به گونه‌ای انتخاب می‌شود که امواج لمب ایجاد شود. در شکل ۳- ب نمونه‌ای با ضخامت ۵/۰ میلی‌متر برای بررسی رفتار امواج لمب نشان داده شده است. سیگنال‌های امواج لمب به علت ایجاد پدیده پراکندگی و نیز امکان ایجاد چندین مد به طور همزمان پیچیده هستند. علاوه بر این اگر در قطعه عیبی وجود داشته باشد، به علت پدیده تغییر مد، پیچیدگی سیگنال دو چندان خواهد شد. به همین دلیل، همواره نیازمند روش‌های پردازش سیگنال برای کاهش پیچیدگی نتایج می‌باشیم. روش‌های متعددی برای پردازش سیگنال‌های حاصل از امواج لمب توسعه داده شده‌اند که در حوزه زمان یا فرکانس عمل می‌کنند. در این میان می‌توان به روش‌های متنوع واپیچش، استفاده از تبدیل فوریه سریع دوبعدی، تبدیل موجک و روش معکوس زمانی اشاره کرد.



الف



ب

شکل ۳) نمونه آزمون کشش برای بررسی موج طولی بحرانی (الف) و امواج لمب (ب)

برای بررسی تغییرات زمان پرواز امواج با تغییرات تنش مطابق شکل ۴، نمونه توسط دستگاه کشش در تنش‌های مختلف تحت بارگذاری قرار می‌گیرد و زمان پرواز موج از طریق نرم‌افزار فراصوت محاسبه می‌شود. به منظور ثابت نگه‌داشتن فیکسچر پروب‌ها بر روی نمونه کشش از دو گیره استفاده می‌شود (شکل ۴).

باز و بسته‌کردن کلمپ‌ها برای حفظ فاصله ثابت پروب‌ها در حین آزمون کشش موجب ایجاد خطایی در محاسبه ضریب آکوستوالاستیک می‌شود. دلیل ایجاد این خطا جابجایی خارج از محور فیکسچر پروب‌ها در حین باز و بسته‌کردن کلمپ‌ها است. به همین دلیل در طول انجام آزمایش کلمپ‌ها بسته باقی مانده و در هنگام محاسبه ضریب آکوستوالاستیک، تغییرات طول نمونه کشش و اثرات آن بر روی زمان پرواز موج به ترتیب طبق روابط (۱۳) و (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$\Delta L = \frac{\sigma L}{E} \quad (13)$$

که در رابطه فوق،  $\Delta L$  تغییرات طول فاصله دو سنسگر در اثر تنش کششی  $\sigma$  است.

$$\llbracket TOF \rrbracket_R = TOF - \Delta L / V_{al} \quad (14)$$

که در رابطه فوق  $TOF_R$  زمان پرواز واقعی موج،  $TOF$  زمان پرواز موج محاسبه شده از طریق نرم‌افزار فراصوت و  $V_{al}$  سرعت موج طولی فراصوت در نمونه آلومینیومی است.

۰/۴۴ و ۰/۶۳ است، و دلیل افزایش تغییرات زمان پرواز پژواک‌های پی در پی است.

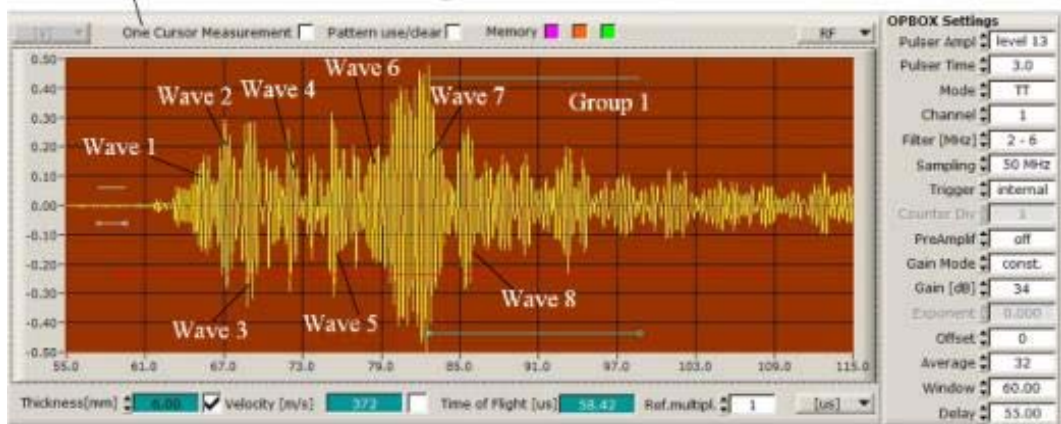
در نمودار ۴ تغییرات زمان پرواز موج اول گروه ۴ (دریافت شده توسط سنشگر اول) نشان داده شده است. همان طوری که از شکل فوق مشاهده می‌شود، با تغییر تنش از ۰ تا ۱۱/۷ مگاپاسکال موج ۰/۳۱ میکروثانیه جابجا می‌شود. در صورتی که مطابق نمودار ۱ برای امواج گروه ۱ این تغییرات برای تنش‌های کمتر از ۱۱/۷ مگاپاسکال، پایین‌تر از ۰/۱ میکروثانیه بوده و به راحتی قابل مشاهده است. بنابراین برای بررسی و مشاهده بهتر تغییرات زمان پرواز موج با تغییرات تنش امواج گروه‌های بالاتر مورد بررسی قرار گرفت. قابل ذکر است که در بررسی ضریب آکوستوالاستیک امواج گروه‌های بالاتر (گروه ۲، ۳ و ۴) نیز باید امواج مورد بررسی را با استفاده از نرم‌افزار فراصوت بزرگ‌نمایی کرده و سپس توسط یکی از نرم‌افزارهای داده‌برداری، تحلیل مربوط به تغییرات زمان پرواز موج را انجام داد. همچنین برای اندازه‌گیری دقیق ضریب آکوستوالاستیک در گروه‌های مختلف باید دو موج معادل هم مورد بررسی قرار گیرند.

در نمودار ۳ تغییرات زمان پرواز موج‌های مختلف از گروه‌های مختلف (دریافت شده توسط سنشگر دوم) برحسب تنش نشان داده شده است. همان طور که از شکل فوق مشاهده می‌شود، امواج هر گروه رفتارهای یکسانی در مقابل تغییرات تنش از خود نشان می‌دهند. بنابراین برای اندازه‌گیری ضریب آکوستوالاستیک می‌توان هر موجی را از هر گروه مورد بررسی قرار داد به شرط آنکه موج معادل آن موج نیز در سنشگر گیرنده دوم مورد بررسی قرار گیرد.

بررسی امواج دریافت شده توسط سنشگرها (Transducer) نشان می‌دهد که، زمانی که سنشگر فرستنده مطابق شکل ۵ موجی را به سمت سنشگر گیرنده ارسال می‌کند، بخشی از این موج توسط سنشگر گیرنده جذب شده و بخش دیگری از آن بعد از برخورد به انتهای نمونه منعکس شده و توسط سنشگر گیرنده دریافت می‌شود و این توالی ادامه پیدا می‌کند. بنابراین همان طوری که از شکل ۵ مشاهده می‌شود، این عامل باعث ایجاد گروه‌های مختلفی از پژواک در صفحه نمایش فراصوت می‌شود. همچنین با توجه به منحنی‌های نمودار ۳ ماکزیمم تغییرات زمان پرواز موج برای گروه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر ۰/۲۶، ۰/۰۷، ۰/۲۶، ۰/۰۷ است.

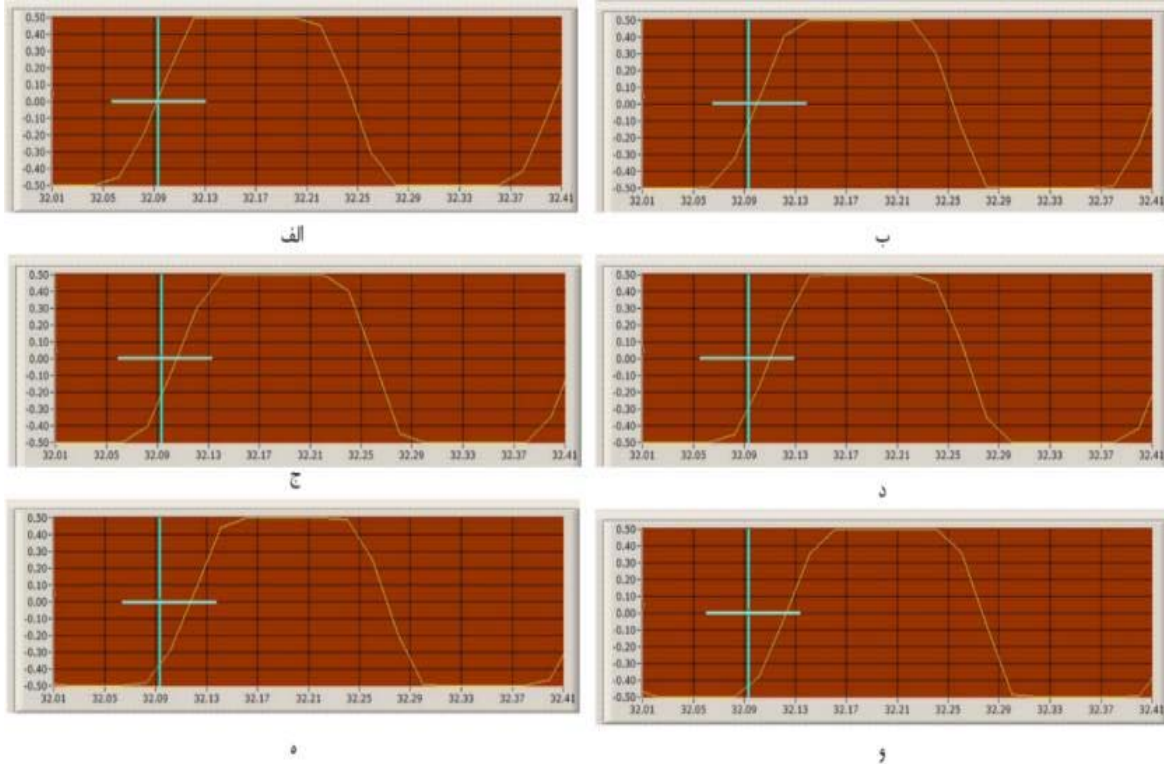


الف

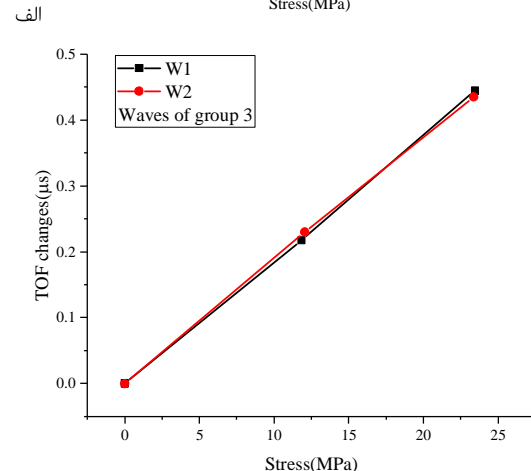
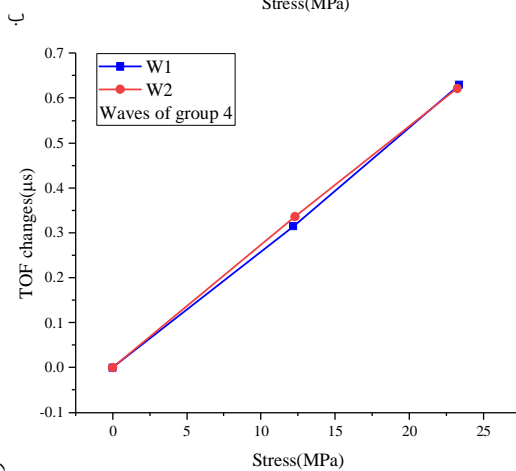
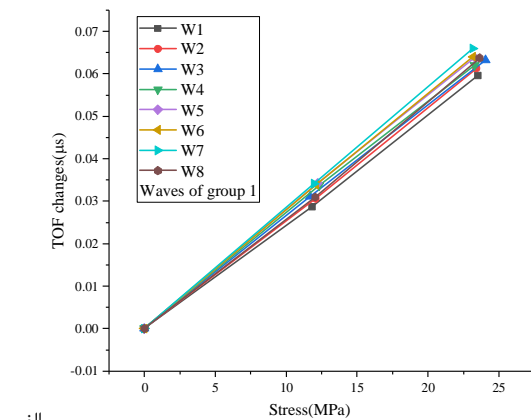
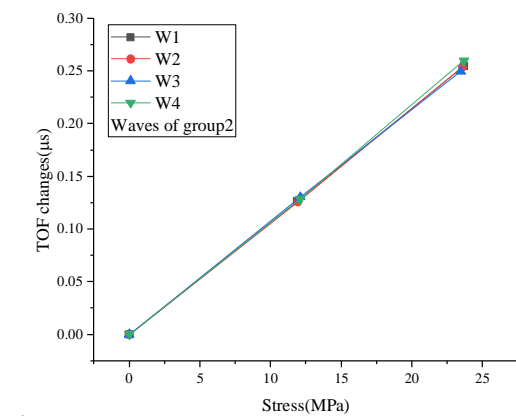


ب

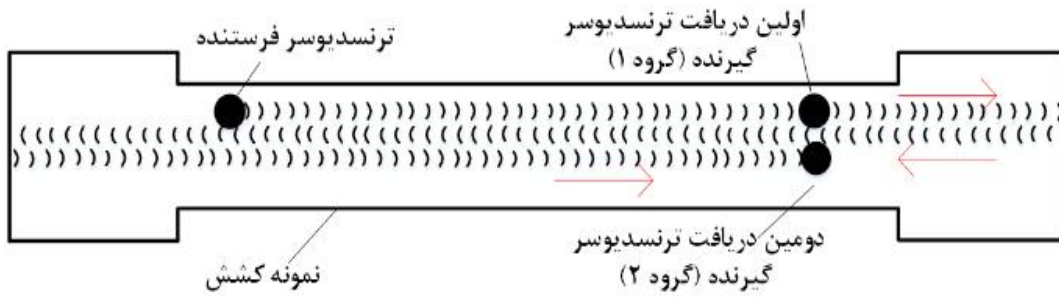
نمودار ۱) الف: امواج دریافت شده توسط سنشگر گیرنده، ب: قسمتی از امواج گروه ۱ (در نمونه کشش ضخیم)



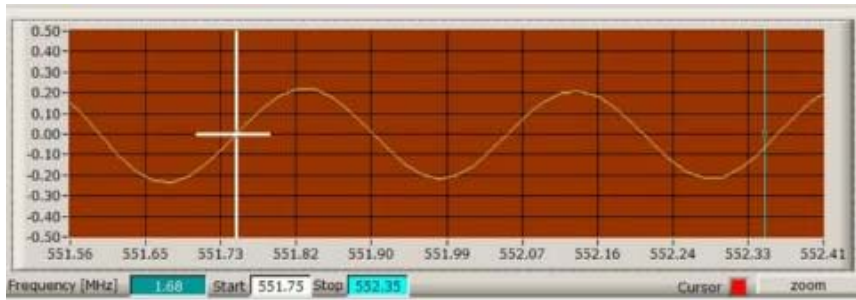
نمودار ۲) تغییرات موج با تنش الف:  $\sigma = 0$ ، ب:  $\sigma = 6.2$ ، ج:  $\sigma = 11.6$ ، د:  $\sigma = 17.5$ ، ه:  $\sigma = 23.3$ ، و:  $\sigma = 28.4$  (دریافتی از سنشگر اول در نمونه کشش ضخیم)



نمودار ۳) تغییرات زمان پرواز امواج گروه‌های مختلف برحسب تغییرات تنش برای الف: گروه ۱، ب: گروه ۲، ج: گروه ۳، د: گروه ۴ (دریافت شده توسط سنشگر گیرنده دوم در نمونه کشش ضخیم)



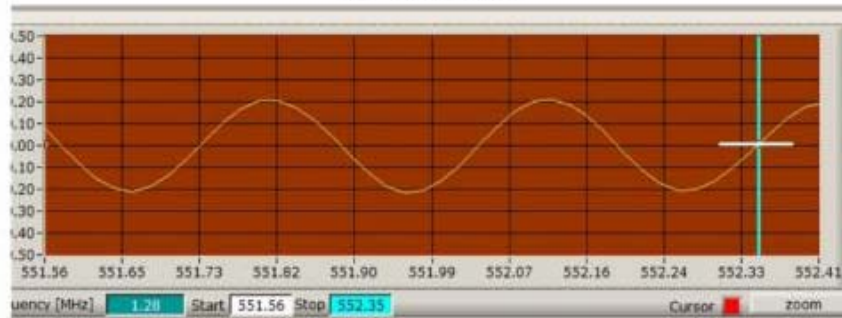
شکل ۵) شماتیکی از تشکیل امواج گروه‌های مختلف در نمونه کشش ضخیم



$\sigma = 0 \text{ MPa}$



$\sigma = 11.78 \text{ MPa}$



$\sigma = 23.17 \text{ MPa}$

نمودار ۴) تغییرات موج اول گروه ۴ با تغییرات تنش

و خطای ناشی از اندازه‌گیری تنش با استفاده از دستگاه آزمون کشش مربوط می‌شود. در صورتی که در محاسبه زمان پرواز موج انانوثانیه و در اندازه‌گیری تنش توسط دستگاه آزمون کشش  $1/\text{مگا پاسکال}$  خطا ایجاد گردد، در محاسبه این ضریب مقدار  $M = \frac{27.5 \text{ MPa}}{36 \text{ ns}} = 0.764 \frac{\text{MPa}}{\text{ns}}$  قابل ذکر است که با در نظرگیری مقادیر حداقل و حداکثر ضریب  $M$ ،  $\pm 3/2$  درصد خطا در محاسبه ضریب  $M$  ایجاد می‌شود.

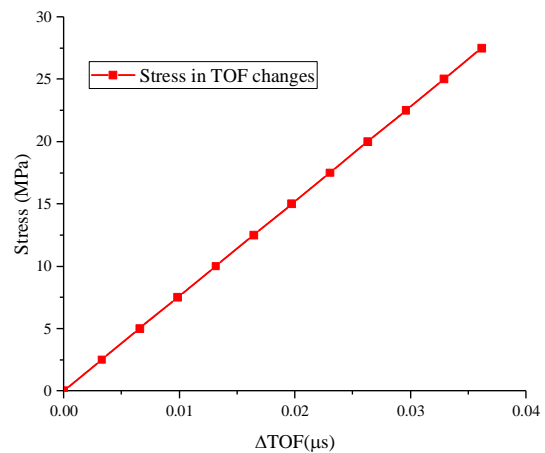
در نمودار ۵ تغییرات تنش برحسب زمان پرواز موج در فاصله بین دو سنسور نشان داده شده است. با توجه به شکل فوق و مقایسه آن با رابطه (۱۲) شیب نمودار در این حالت برابر با ضریب  $M$  بوده و مقدار آن برابر  $0.76 \text{ MPa/ns}$  است. بنابراین با توجه به نمودار ارائه شده در این پژوهش، بدون نیاز به محاسبه ثوابت الاستیک، ضریب آکوستوالاستیک به طریق اندازه‌گیری تجربی محاسبه می‌شود. خطاهای اندازه‌گیری ضریب  $M$ ، به قرابت زمان پرواز موج



شده توسط سنجشگرها مطابق نمودار ۶ تنها از گروه اول تشکیل شده است. بررسی تحلیلی امواج لمب در نمونه آلومینیومی بیانگر تشکیل امواج لمب نوع  $A_0$  و  $S_0$  در  $f \times t$  های پایین است، به طوری که سرعت  $S_0$  بیشتر از  $A_0$  است [35]. بنابراین موج دریافت شده اول در نمودار ۶ مربوط به  $S_0$  و موج های بعدی مربوط به  $A_0$  هستند.

در نمودار ۷ تغییرات زمان پرواز موج  $S_0$  با تغییرات تنش نشان داده شده است (موج دریافت شده توسط سنجشگر دوم). همان طور که از نمودار فوق قابل مشاهده است، تغییرات زمان پرواز موج لمب نوع  $S_0$  با تغییرات تنش نسبت به موج طولی بحرانی بسیار شدید بوده، به طوری که با افزایش تنش تا ۱۸/۷ مگاپاسکال، زمان پرواز موج ۵/۳۰ نانوثانیه افزایش پیدا می کند.

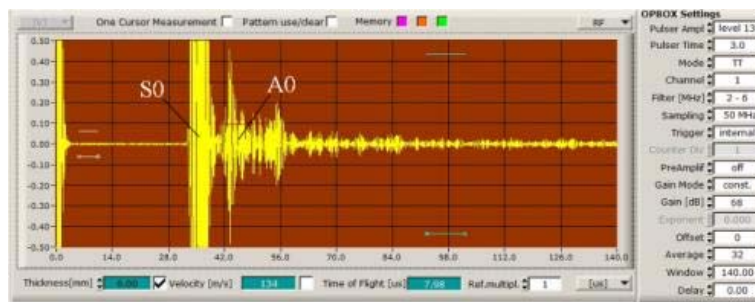
در نمودار ۸ تغییرات زمان پرواز امواج لمب نوع  $S_0$  و  $A_0$  و امواج طولی بحرانی با تغییرات تنش در فاصله بین دو سنجشگر دریافت کننده آورده شده است. همان طور که از نمودار ۸ مشاهده می شود، تغییرات امواج لمب  $S_0$  و  $A_0$  با تغییر تنش نسبت به امواج طولی بحرانی بسیار شدیدتر بوده و موج لمب  $S_0$  نسبت به  $A_0$  نسبت به تغییرات تنش حساس تر است. همچنین با توجه به نمودار ۷، شیب نمودار  $S_0$  برابر با  $0.20 \text{ MPa/ns}$  و شیب نمودار  $A_0$  برابر با  $0.40 \text{ MPa/ns}$  است. بررسی تغییرات امواج با تغییرات تنش نشان می دهد که، تغییرات زمان پرواز امواج لمب  $S_0$  و  $A_0$ ، به ترتیب برابر  $3/75$  و  $1/91$  برابر تغییرات طولی بحرانی است. بنابراین تغییرات زمان پرواز موج  $S_0$ ،  $1/96$  برابر تغییرات زمان پرواز موج  $A_0$  است.



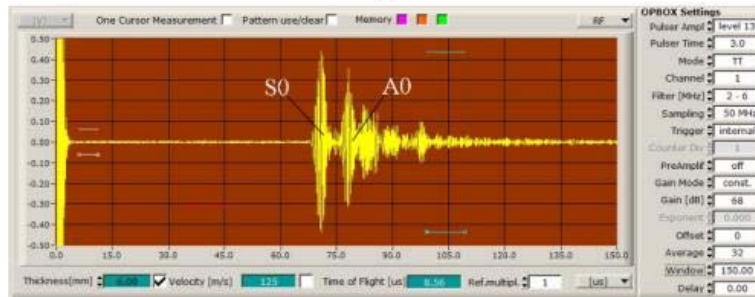
نمودار ۵) تغییرات تنش با تغییرات زمان پرواز موج در فاصله بین دو سنجشگر

#### ۲-۴- بررسی رفتار امواج لمب با تغییرات تنش

برای بررسی رفتار امواج لمب در برابر تغییرات تنش، نمونه کشش با ضخامت کم (۵/۰ میلی متر) و از همان جنس نمونه قبلی، در تنش های مختلف تحت بارگذاری قرار گرفته شده و رفتار امواج لمب مورد بررسی قرار می گیرد. در نمودار ۶ منحنی های امواج دریافت شده توسط سنجشگر گیرنده اول و دوم با تقویت ۶۸ دسی بل نشان داده شده است. همان طور که از نمودار فوق مشاهده می شود، سرعت تضعیف امواج لمب بسیار شدید بوده و با حرکت در فاصله بین سنجشگر گیرنده اول و دوم به شدت تضعیف می شوند. علت این تضعیف نوع امواج (امواج لمب، امواج عرضی هستند) و سرعت کم آنها در مقایسه با امواج طولی بحرانی است [33]. همچنین شدت تضعیف امواج لمب موجب حذف گروه های بعدی امواج می شود، به طوری که امواج دریافت

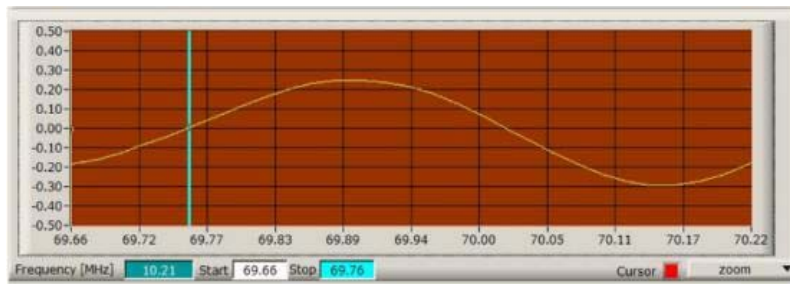


الف

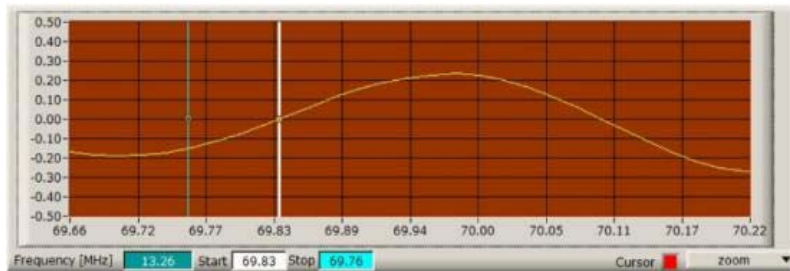


ب

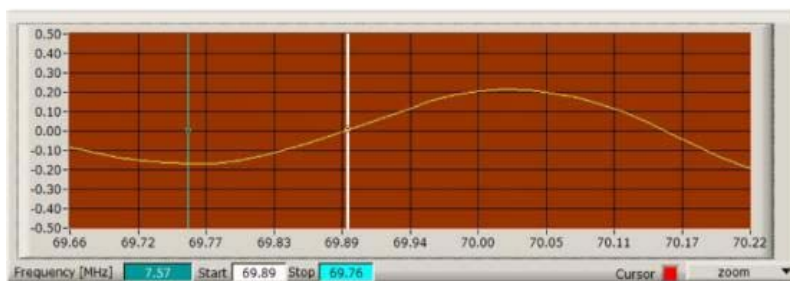
نمودار ۶) امواج لمب دریافت شده توسط؛ الف سنجشگر اول، ب سنجشگر دوم در نمونه با ضخامت کم



$\sigma=0$  MPa



$\sigma=10.94$  MPa



$\sigma=18.701$  MPa

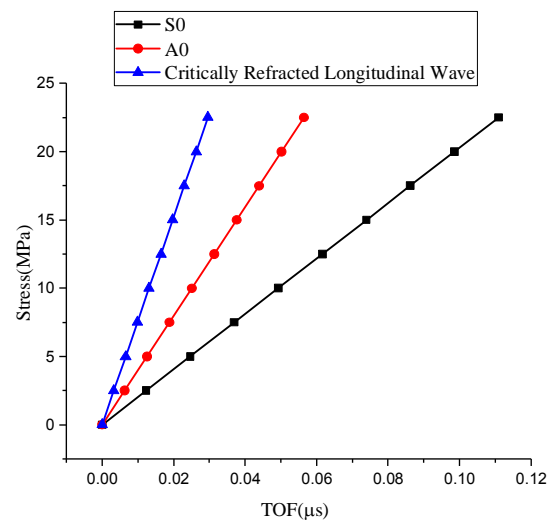
نمودار ۷) تغییرات موج  $S_0$  با تغییرات تنش (دریافت شده توسط سنجشگر گیرنده دوم در نمونه با ضخامت کم)

مربوط به آن موج، تنش در نمونه اصلی به دست آمد. قابل ذکر است که نتایج آزمایشات بررسی امواج نشان می‌دهد که امواج مشاهده شده در گروه‌های مختلف مطابق نمودار ۱ به دلیل آنکه تغییرات تنش بسیار متفاوتی از خود نشان می‌دهند، از نوع امواج لمب نیستند.

### ۵- نتایج

هدف از این پژوهش ارایه روشی تجربی برای اندازه‌گیری دقیق ضریب آکوستوالاستیک و بررسی رفتار امواج طولی بحرانی و امواج لمب در برابر تغییرات تنش است. در روش ارایه شده برای بررسی رفتار امواج مختلف در برابر تغییرات تنش، از دو سنجشگر گیرنده برای بررسی امواج استفاده شد. در نهایت با بررسی امواج دریافت شده در نمونه‌های کشش با ضخامت‌های ۵ میلی‌متر (برای بررسی امواج طولی بحرانی) و ۵/۰ میلی‌متر (برای بررسی امواج لمب) نتایج زیر به دست می‌آید:

۱- سرعت تضعیف امواج لمب در مقایسه با امواج طولی بحرانی بسیار بیشتر است. دلیل این تضعیف آن است که، امواج طولی بحرانی از گروه‌های مختلفی تشکیل شده‌اند در صورتی که امواج لمب از یک گروه تشکیل می‌شوند.



نمودار ۸) تغییرات زمان پرواز موج  $S_0$ ،  $A_0$  و موج طولی بحرانی با تغییرات تنش در فاصله بین دو سنجشگر گیرنده

بنابراین با توجه به رفتار متفاوت امواج لمب در برابر تغییرات تنش، برای محاسبه تنش در قطعات کم ضخامت، نمونه کشش ساخته شد و سپس رفتار امواج لمب در برابر تغییرات تنش مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با محاسبه ضریب آکوستوالاستیک

4- Olabi A, Hashmi M. Stress relief procedures for low carbon steel (1020) welded components. Journal of Materials Processing Technology. 1996;56(1-4):552-562.

5- Olabi A, Hashmi M. Effects of the stress-relief conditions on a martensite stainless-steel welded component. Journal of Materials Processing Technology. 1998;77(1-3):216-225.

6- Olabi A, Casalino G, Benyounis K, Rotondo A. Minimisation of the residual stress in the heat affected zone by means of numerical methods. Materials & Design. 2007;28(8):2295-2302.

7- Crecraft D. The measurement of applied and residual stresses in metals using ultrasonic waves. Journal of Sound and Vibration. 1967;5(1):173-192.

8- Egle D, Bray D. Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel. The Journal of the Acoustical Society of America. 1976;60(3):741-744.

9- Tang W, Bray DE. Stress and yielding studies using critical refracted longitudinal wave. New York: American Society of Mechanical Engineers; 1996.

10- Bray DE, Tang W. Subsurface stress evaluation in steel plates and bars using the LCR ultrasonic wave. Nuclear Engineering and Design. 2001;207(2):231-240.

11- Javadi Y, Akhlaghi M, Najafabadi MA. Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding longitudinal residual stress through the thickness in austenitic stainless steel plates. Materials & Design. 2013;45:628-642.

12- Sadeghi S, Najafabadi MA, Javadi Y, Mohammadisefat M. Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates. Materials & Design. 2013;52:870-880.

13- Javadi Y, Pirzaman HS, Raeisi MH, Najafabadi MA. Ultrasonic inspection of a welded stainless steel pipe to evaluate residual stresses through thickness. Materials & Design. 2013;49:591-601.

14- Belahcene F, Lu J. Determination of residual stress using critically refracted longitudinal waves and immersion mode. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2002;37(1):13-20.

15- Javadi Y, Pirzaman HS, Raeisi MH, Najafabadi MA. Ultrasonic evaluation of welding residual stresses in stainless steel pressure vessel. Journal of Pressure Vessel Technology. 2013;135(4):041502.

16- Javadi Y, Najafabadi MA, Akhlaghi M. Residual stress evaluation in dissimilar welded joints using finite element simulation and the L CR ultrasonic wave. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2012;48(9):541-552.

17- Javadi Y, Afzali O, Raeisi MH, Najafabadi MA. Nondestructive evaluation of welding residual stresses in dissimilar welded pipes. Journal of Nondestructive Evaluation. 2013;32(2):177-187.

18- Javadi Y, Akhlaghi M, Najafabadi MA. Nondestructive evaluation of welding residual stresses in austenitic stainless steel plates. Research in Nondestructive Evaluation. 2014;25(1):30-43.

19- Sattari-Far I, Javadi Y. Influence of welding sequence on welding distortions in pipes. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2008;85(4):265-274.

20- Javadi Y. Ultrasonic measurement of hoop residual stress in stainless steel pipes. Manufacturing and Industrial Engineering. 2013;12(1-2):1-6.

21- Javadi Y, Hloch S. Employing the waves to measure longitudinal residual stresses in different depths of a

۲- امواج و گروه‌های مختلف در موج طولی بحرانی رفتار کاملاً یکسانی را نشان می‌دهد به همین دلیل می‌توان از هر گروه برای اندازه‌گیری ضریب آکوستوالاستیک استفاده کرد به شرط آنکه دو موج معادل هم در دو سنجشگر گیرنده مورد بررسی قرار گیرد.

۳- تغییرات زمان پرواز موج با تنش در امواج طولی بحرانی بسیار ناچیز بوده، در حالی که تغییرات زمان پرواز موج در امواج لمب شدید است. به طوری که آنالیز داده‌های حاصل از تغییرات زمان پرواز موج برحسب تنش نشان می‌دهد که، در فاصله بین دو سنجشگر گیرنده تغییرات تنش با زمان پرواز موج امواج طولی بحرانی،  $S_0$  و  $A_0$  برای نمونه آلومینیوم ۱۰۵۰ به ترتیب برابر با  $0.76\%$  و  $0.2\%$  و  $MPa/ns$   $0.4\%$  است.

**تشکر و قدردانی:** از همکاری مسئولین کارگاه ماشین ابزار دانشگاه صنعتی امیرکبیر مخصوصاً جناب آقای مهندس مهدوی در ساخت نمونه‌ها قدردانی می‌گردد.

**تأییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

**سهام نویسندگان:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

#### ۶- فهرست علائم

TOF	زمان پرواز موج
$\sigma$	تنش
$m$	ضریب مرتبه سه الاستیک ماده
$l$	ضریب مرتبه سه الاستیک ماده
$L$	فاصله دو سنجشگر گیرنده
$V$	سرعت موج
$k$	ضریب آکوستوالاستیک
$M$	شیب تغییرات تنش نسبت به زمان پرواز موج
<b>علائم یونانی</b>	
$\Lambda$	ضریب مرتبه دوم الاستیک ماده
$\mu$	ضریب مرتبه دوم الاستیک ماده
$\theta$	زاویه برخورد
<b>زیرنویس‌ها</b>	
$al$	آلومینیوم
$R$	واقعی
$0$	حالت بدون تنش
$c$	بحرانی

#### منابع

1- Rossini N, Dassisti M, Benyounis K, Olabi AG. Methods of measuring residual stresses in components. Materials & Design. 2012; 35:572-588.

2- Olabi A, Hashmi M. The effect of post-weld heat-treatment on mechanical-properties and residual-stresses mapping in welded structural steel. Journal of Materials Processing Technology. 1995;55(2):117-122.

3- Olabi A, Hashmi M. The microstructure and mechanical properties of low carbon steel welded components after the application of PWHTs. Journal of Materials Processing Technology. 1996;56(1-4):88-97.

- 29- Liu H, Li Y, Li T, Zhang X, Liu Y, Liu K, Wang Y. Influence factors analysis and accuracy improvement for stress measurement using ultrasonic longitudinal critically refracted (LCR) wave. *Applied Acoustics*. 2018;141:178-187.
- 30- Wang W, Xu C, Zhang Y, Zhou Y, Meng S, Deng Y. An improved ultrasonic method for plane stress measurement using critically refracted longitudinal waves. *NDT & E International*. 2018;99:117-122.
- 31- Bermes C, Kim JY, Qu J, Jacobs LJ. Experimental characterization of material nonlinearity using Lamb waves. *Applied Physics Letters*. 2007;90(2):021901.
- 32- Niethammer M, Jacobs LJ, Qu J, Jarzynski J. Time-frequency representations of Lamb waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2001;109(5):1841-1847.
- 33- Mohabuth M, Kotousov A, Ng CT. Effect of uniaxial stress on the propagation of higher-order Lamb wave modes. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2016;86:104-111
- 34- Wang L, Yuan F. Group velocity and characteristic wave curves of Lamb waves in composites: Modeling and experiments. *Composites Science and Technology*. 2007;67(7-8):1370-1384.
- 35- Pei N, Bond LJ. Higher order acoustoelastic Lamb wave propagation in stressed plates. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2016;140(5):3834-3843.
- stainless steel welded plate. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2013;2013:746187.
- 22- Xu C, Song W, Pan Q, Li H, Liu S. Nondestructive testing residual stress using ultrasonic critical refracted longitudinal wave. *Physics Procedia*. 2015;70:594-598.
- 23- Liu B, Dong S. Stress evaluation of laser cladding coating with critically refracted longitudinal wave based on cross correlation function. *Applied Acoustics*. 2016;101:98-103.
- 24- Zhan Y, Liu C, Kong X, Lin Z. Experiment and numerical simulation for laser ultrasonic measurement of residual stress. *Ultrasonics*. 2017;73:271-276.
- 25- Zhan Y, Li Y, Zhang E, Ge Y, Liu C. Laser ultrasonic technology for residual stress measurement of 7075 aluminum alloy friction stir welding. *Applied Acoustics*. 2019;145:52-59.
- 26- Wang W, Zhang Y, Zhou Y, Meng S, Chen D. Plane stress measurement of orthotropic materials using critically refracted longitudinal waves. *Ultrasonics*. 2018;94:430-437.
- 27- Mao H, Zhang Y, Mao H, Li X, Huang Z. Stress evaluation of metallic material under steady state based on nonlinear critically refracted longitudinal wave. *Results in Physics*. 2018;9:665-672.
- 28- He J, Li Z, Teng J, Li M, Wang Y. Absolute stress field measurement in structural steel members using the Lcr wave method. *Measurement*. 2018;122:679-687.