



## Measurement of Acoustoelastic Constant in Iron-Base Alloy Based on Acoustoelasticity Theory for Stress Evaluation

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Mohammadi M.<sup>1</sup> MSc,  
Jafari Fesharaki J.<sup>\*1</sup> PhD

#### How to cite this article

Mohammadi M, Jafari Fesharaki J. Measurement of Acoustoelastic Constant in Iron-Base Alloy Based on Acoustoelasticity Theory for Stress Evaluation. Modares Mechanical Engineering. 20-19;19(10): 2321-2328.

### ABSTRACT

This study aims to investigate the ability of ultrasonic method by using critically refracted longitudinal (LCR) wave for measuring stress in the elastic phase of an iron-base alloy and an equation includes of acoustoelastic constant was provided. For this purpose, extract detail of metal alloy components was achieved by use of quantometer analysis testing and . In order to send and receive the LCR wave into the samples, the investigation leads to design a unique type of ultrasonic fixture. The fixture was made based on Snell's law that only in one part. In the next step, different amounts of stress were applied to the specimens by using a uniaxial tensile testing machine and record stress-strain curve data. To this end, more than three metal samples were used in the study. Measurement of longitudinal applied stress by ultrasonic method was done by using 2MHz probes based on Acoustoelasticity theory and close to the surface of the samples. After conducting the experimental tests, the results indicated that there was a significant relation between stress and time of flight and wave speed in the elastic phase of the used sample. Every material has a unique acoustoelastic constant that can determine stress value by having times of flight wave. The conclusions of the study provide a gradient of a line that known as an acoustoelastic constant. Finally, by comparing the results of the used method with other researchers results, findings showed that there were good agreements between them which shows the good capability of acoustoelasticity theory in the measurement of stress.

**Keywords** Acoustoelastic Constant; Acoustoelasticity Theory; Time of Flight; Stress Measurement; LCR Wave

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

#### \*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran  
Phone: +98 (31) 42292278  
Fax: +98 (31) 42291016  
jafari@pmc.iaun.ac.ir

#### Article History

Received: July 11, 2018  
Accepted: February 13, 2019  
ePublished: October 22, 2019

### CITATION LINKS

[1] Finite deformations of an elastic solid [2] A mechanical determination of biaxial residual stress in sheet materials [3] Second-order elastic deformation of solids [4] Ultrasonic measurement of stress in railroad wheels and in long lengths of welded rail [5] Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel [6] Determination of near surface residual stresses on welded joints using ultrasonic methods [7] Evaluation of the rolling direction effect in the acoustoelastic properties for API 5L X70 steel used in pipelines [8] The effect of ultrasonic excitation in metal forming tests [9] Residual stresses in laser welded aluminium plate by use of ultrasonic and optical methods [10] Defect detection using ultrasonic arrays: The multi-mode total focusing method [11] Relaxation methods for measuring residual stresses: Techniques and opportunities [12] Ultrasonic inspection of a welded stainless steel pipe to evaluate residual stresses through thickness [13] Evaluation of welding residual stress in stainless steel pipes by using the LCR ultrasonic waves [14] Stress evaluation of laser cladding coating with critically refracted longitudinal wave based on cross correlation function [15] An improved ultrasonic method for plane stress measurement using critically refracted longitudinal waves [16] Laser ultrasonic technology for residual stress measurement of 7075 aluminum alloy friction stir welding [17] ASTM E8 / E8M - 09, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Internet]

# اندازه‌گیری ضریب آکوستوالاستیک در یک آلیاژ فلزی پایه آهن براساس تئوری آکوستوالاستیسیته به منظور ارزیابی تنش

محمد محمدی MSc

گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

جواد جعفری فشارکی PhD\*

گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

## چکیده

در این پژوهش توانایی روش اولتراسونیک با بهره‌گیری از امواج طولی با زاویه شکست بحرانی که به اختصار از آنها با نام امواج LCR نیز در مقالات علمی یاد شده است، نسبت به میزان تنش‌های مختلف در ناحیه الاستیک بررسی و رابطه‌ای شامل مقدار ضریب آکوستوالاستیک برای آن ارایه شد. برای این منظور مشخصات دقیق عناصر تشکیل‌دهنده نمونه فلزی با استفاده از آزمون کوآنتومتری به دست آمد و مقادیر متفاوتی از تنش‌های طولی با استفاده از دستگاه کشش تک‌محوره درون نمونه فلزی به وجود آمد، سپس به منظور اندازه‌گیری تنش طولی با استفاده از امواج LCR، نگهدارنده‌ای برای پروپ‌های نرمال ۲ مگاهرتزی براساس قانون اسل ساخته شد و با ارسال این امواج، میزان تنش موجود در عمق مشخصی از سطح قطعه و براساس تئوری آکوستوالاستیسیته مورد بررسی قرار گرفت. با اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت این امواج، برای فلزی که عناصر تشکیل‌دهنده آن به دست آمد، رابطه‌ای به منظور برآورد میزان تنش موجود در محدوده الاستیک (مقدار ضریب آکوستوالاستیک) حاصل گشت، همچنین یکی از عوامل به وجود آورنده خطا در این آزمون معرفی شد. به منظور اعتبارسنجی، روند داده‌های حاصله همچون صعودی یا نزولی بودن سرعت امواج یا زمان پرواز (بسته به نوع اندازه‌گیری) و میزان آنها در تطابق کاملی منطقی با روند و میزان داده‌های دیگر پژوهشگران که برای فلزات دیگر به دست آورده بودند قرار داشت که این نشان از دقت بالای تئوری آکوستوالاستیسیته برای اندازه‌گیری تنش بود.

**کلیدواژه‌ها:** ضریب آکوستوالاستیک، تئوری آکوستوالاستیسیته، زمان پرواز موج، اندازه‌گیری تنش، امواج LCR

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴

\*نویسنده مسئول: jafari@pmc.iaun.ac.ir

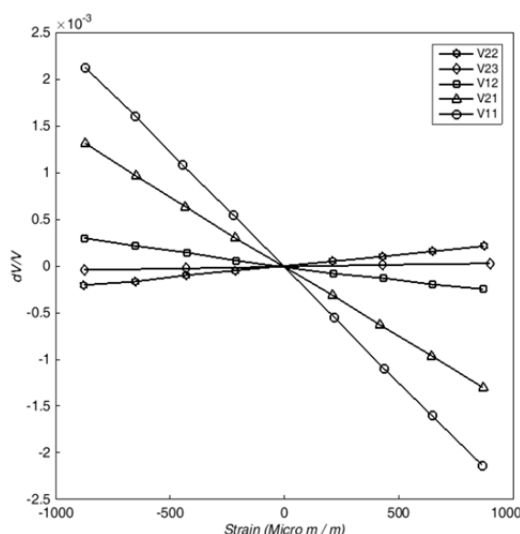
## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر پیشرفت‌های زیادی در زمینه اندازه‌گیری و تحلیل تنش در اجسام موجود آمده است. روش‌هایی که با هدف برآورد میزان تنش مورد استفاده قرار می‌گیرند، به دو دسته کلی مخرب و غیر مخرب تقسیم می‌شوند، اما در آزمون‌های مخرب، عموماً قطعه شامل تغییراتی می‌شود و یا بکلی از بین می‌رود که معمولاً استفاده مجدد از آنها غیر ممکن خواهد شد. همین امر باعث شد تا روش‌های مخرب در قطعاتی که در حال کارکردن هستند و یا قسمتی از یک مجموعه مونتاژ شده هستند، کارایی خود را از دست بدهند که این خود می‌تواند ضرورت استفاده و توسعه هرچه بیشتر از روش‌های غیرمخرب را در صنعت به اثبات برساند. از جمله روش‌های غیرمخرب اندازه‌گیری تنش، می‌توان به روش‌های پراش اشعه X، پراش نوترون، مغناطیسی، فوتوالاستیک و روش اولتراسونیک اشاره کرد.

در بین روش‌های یادشده، تنها با استفاده از روش اولتراسونیک و بسته به نوع پروپ انتخابی و فرکانس اعمالی به آن می‌توان علاوه بر اندازه‌گیری تنش‌های سطحی، در عمقی مشخص از سطح قطعه کار نیز تنش را مورد بررسی قرار داد. حضور تنش در جسم باعث بوجود آمدن تغییر در سرعت امواج صوتی درون آن جسم می‌شود که این مهم از خاصیت آکوستوالاستیک ماده تاثیر می‌پذیرد. این

موضوع سبب شد تا از روش اولتراسونیک بعنوان یک روش کاربردی برای ارزیابی تنش‌ها استفاده شود تا جایی که اندازه‌گیری سرعت و یا زمان پرواز این امواج می‌تواند بعنوان معیاری برای تشخیص تنش در اجسام مورد استفاده قرار گیرد.

اندازه‌گیری تنش با روش اولتراسونیک تاریخچه‌ای بسیار قدیمی دارد بطوریکه می‌توان گفت مورناگان در سال ۱۹۳۷ نظریه روش اولتراسونیک را پایه‌گذاری کرد<sup>[1]</sup>. تروئینگ و رید با استفاده از یک روش مکانیکی توانستند تنش‌های غیریکنواخت را در یک ورق فلزی بصورت کیفی برآورد کنند<sup>[2]</sup>. هیوئیس و کلی براساس نظریه الاستیسیته‌ای که توسط مورناگان حاصل شده بود، رابطه بین سرعت امواج در روش اولتراسونیک با کرنش‌های بوجود آمده را در یک نمونه همسانگرد بدست آوردند و بدین وسیله نظریه آکوستوالاستیک را بنا نهادند<sup>[3]</sup>. از جمله اولین ناشران در زمینه اولتراسونیک، کوئفلیتر و ریش بودند که با استفاده از این روش به اندازه‌گیری تنش در آلومینیوم‌های مورد استفاده در صنعت هواپیماسازی پرداختند<sup>[4]</sup>. پس از آنها/یگل و بری قطعه‌ای ضخیم را تحت تنش تک‌محوره در دو حالت کششی و فشاری قرار دادند و امواج اولتراسونیک را بموازات و عمود بر میدان تنش اعمالی درون قطعه کار وارد ساختند و تغییرات نسبی سرعت امواج اولتراسونیک را نسبت به کرنش‌هایی که در محدوده الاستیک بوجود آمده، برای نمونه‌های تحت آزمایش رسم کردند. آنها همچنین بیان کردند که جهت میدان تنش در جسم، جهت انتشار موج اولتراسونیک (Direction of Travel) و جهت لرزش یا حرکات ذرات (Particle Motion) ناشی از عبور امواج اولتراسونیک از جمله پارامترهای حائز اهمیت و تاثیرگذار در اندازه‌گیری تنش محسوب می‌شوند، بگونه‌ای که اگر جهت لرزش ذرات (جهت پلاریزاسیون) و جهتی که موج اولتراسونیک گسیل داده می‌شود بموازات میدان تنش ایجاد شده باشد، یعنی LCR یا همان V<sub>11</sub> بطوریکه اندیس اول آن نشان‌دهنده جهت انتشار امواج اولتراسونیک در قطعه و اندیس دوم نشان‌دهنده جهت لرزش ذرات باشد. تغییرات سرعت نسبت به تغییرات کرنش در ناحیه الاستیک بیشترین حساسیت و تاثیرپذیری را دارد. همچنین با مقایسه دو سرعت V<sub>13</sub> و V<sub>31</sub> در نمودار ۱ مشخص شد، در صورتی که میدان تنش ایجادشده بموازات جهت پلاریزاسیون امواج اولتراسونیک باشد، تغییرات سرعت نسبت به تغییرات کرنش یا تنش حساسیت بیشتری را نشان خواهد داد<sup>[5]</sup>.



نمودار ۱) تغییرات نسبی سرعت موج برحسب تابعی از کرنش<sup>[5]</sup>

ژان و همکاران برای دو ورق از جنس آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ که به‌روش اصطکاکی به یکدیگر جوش داده شده بودند ضریب آکوستوالاستیک را محاسبه کردند [16].

امروزه تلاش‌ها برای توسعه روش اولتراسونیک به نحوی است که پژوهشگران همچنان می‌کوشند تا مقدار ضریب آکوستوالاستیک را برای فلزات و آلیاژهای مختلف محاسبه نمایند و بدین منظور در این پژوهش نیز با انجام یک آزمون کوانتومتری روی آلیاژ پایه آهنی که برای انجام آزمایش از آن بهره برده شد، مشخصات دقیق عناصر تشکیل‌دهنده آلیاژ محاسبه شد و سپس ضریب آکوستوالاستیک برای آلیاژ مورد نظر محاسبه و ارایه گردید.

## ۲- معادلات حاکم بر مسأله

در مساله در نظر گرفته شده برای یک جسم ایزوتروپیک، هیوئیس و کلی روابط موجود بین سرعت امواج اولتراسونیک با کرنش‌های الاستیک را برای حالتی که  $i \neq j$  باشد بصورت معادله ۱ بیان کردند [3].

$$\rho_0 V_{ij}^2 = \mu + (m + \lambda)\theta + 4\mu\alpha_i + 2\mu\alpha_j - \frac{1}{2}n\alpha_k \quad (1)$$

که در معادله ۱،  $\rho_0$  چگالی قطعه بدون تنش،  $\lambda$  و  $\mu$  و همچنین  $l$  و  $m$  و  $n$  برترتیب ثابت‌های الاستیک درجه دوم و درجه سوم،  $\alpha_i$  نشان‌دهنده کرنش‌های اصلی در جسم و  $V_{ij}$  بیانگر سرعت امواج اولتراسونیک است. در صورتیکه در مقادیر  $i = j$  معادله ۱ بصورت معادلات ۲ الی ۴ بیان خواهد شد.

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu) + \alpha_1 \quad (2)$$

$$\rho_0 V_{22}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu) + \alpha_2 \quad (3)$$

$$\rho_0 V_{33}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu) + \alpha_3 \quad (4)$$

اگر قطعه کار تحت تنش تک‌محوره قرار گیرد و کرنش در این جهت برابر  $\varepsilon$  و ضریب پواسون برابر با  $\nu$  باشد، معادلات ۱ الی ۴ را می‌توان بصورت معادلات ۵ الی ۹ نیز محاسبه کرد [3].

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu \left[ 4(2\mu + \lambda) + 2(\mu + 2m) + \nu \times \mu \left( 1 + \frac{2l}{\lambda} \right) \right] \varepsilon \quad (5)$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \rho_0 V_{13}^2 = \mu + \left[ 4\mu + m(1 - 2\nu) + \nu \left( \frac{n}{2} \right) \right] \varepsilon \quad (6)$$

$$\rho_0 V_{22}^2 = \lambda + 2\mu + [2l(1 - 2\nu) - 4\nu(m + \lambda + 2\mu)] \varepsilon \quad (7)$$

$$\rho_0 V_{21}^2 = \rho_0 V_{31}^2 = \mu + \left[ (\lambda + 2\mu + m)(1 - 2\nu) + \nu \left( \frac{n}{2} \right) \right] \varepsilon \quad (8)$$

$$\rho_0 V_{23}^2 = \rho_0 V_{32}^2 = \mu + \left[ (\lambda + m)(1 - 2\nu) - 6\mu \times \nu \left( \frac{n}{2} \right) \right] \varepsilon \quad (9)$$

در صورتیکه براساس کرنش صورت‌گرفته در قطعه، تغییرات سرعت امواج اولتراسونیک مطلوب باشند، لازم است از طرفین معادلات یادشده نسبت به کرنش، مشتق گرفته شود تا معادلات ۱۰ الی ۱۴ حاصل شوند [5].

$$\frac{dV_{11}/V_{11}^0}{d\varepsilon} = 2 + \frac{\mu + 2m + \mu \times \nu \left( 1 + \frac{2l}{\lambda} \right)}{\lambda + 2\mu} = L_{11} \quad (10)$$

$$\frac{dV_{12}/V_{12}^0}{d\varepsilon} = 2 + \frac{n \times \nu}{4\mu} + \frac{m}{2(\lambda + \mu)} = L_{12} \quad (11)$$

$$\frac{dV_{21}/V_{21}^0}{d\varepsilon} = \frac{\lambda + 2\mu + m}{2(\lambda + \mu)} + \frac{n \times \nu}{4\mu} = L_{21} \quad (12)$$

$$\frac{dV_{22}/V_{22}^0}{d\varepsilon} = -2\nu \left[ 1 + \frac{m - \mu l / \lambda}{\lambda + 2\mu} \right] = L_{22} \quad (13)$$

$$\frac{dV_{23}/V_{23}^0}{d\varepsilon} = \frac{m - 2\mu}{2(\lambda + \mu)} + \frac{n}{4\mu} = L_{23} \quad (14)$$

تانالا و همکاران با بهره‌گرفتن از روش اولتراسونیک و تست کشش توانستند تنش را در نزدیکی سطح قطعه کارشان اندازه بگیرند و ضریب آکوستوالاستیک را برای آلومینیوم ۵۰۸۶ محاسبه کنند [6].

سنتوس بکمک چند نفر از همکارانش تاثیرپذیری روش اولتراسونیک را برای اندازه‌گیری میزان تنش‌های مختلف در ناحیه الاستیک روی لوله استیلی از جنس API 5L X70 بررسی و مقدار ضریب آکوستوالاستیک را برای نمونه مورد آزمونشان بیان کردند. آنها در کارشان از هر دو موج طولی و برشی استفاده کردند و در گزارش نتایج کارشان اعلام کردند که تقریباً ۳۰٪ اختلاف بین حالت بدون تنش با حالت تنش‌دار وجود دارد. همچنین اعلام کردند تاثیرپذیری موج طولی نسبت به تنش پسماند در مقایسه با موج عرضی یا برشی بیشتر است [7].

عبدالعزیز و لوكاس تاثیر تحريك امواج اولتراسونيك را در يك فرآيند شكل‌دهی برای فلز فولادی بررسی کردند [8].

یا و همکاران ضریب آکوستوالاستیک را برای تنش ناشی از فرایند جوشکاری با لیزر را برای یک ورق آلومینیومی اندازه گرفتند [9].

ژانگ و همکاران با استفاده از آرایه‌های اولتراسونیک و روش متمرکز چند حالت از روش‌های تشخیص عیب را بررسی کردند و بهینه‌ترین جایگذاری برای پروب را در کارشان معرفی کردند [10].

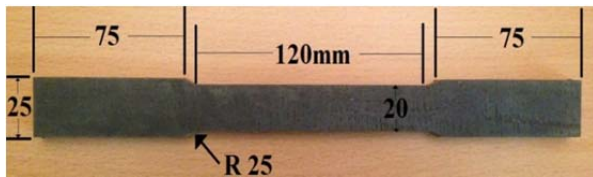
در نتایج تحقیقی که شاجر انجام داد، بیان شد که هر گونه تغییری در ضخامت لایه نازک کوپلنت (Couplant Film) تاثیر بسیار جدی بر دقت اندازه‌گیری و همچنین نتایج حاصل از آزمون می‌گذارد. چرا که از کوپلنت بمنظور پرکردن فضای خالی بین سطح قطعه کار و نگهدارنده پروب‌ها و همچنین سطح تماس خود پروب‌ها با نگهدارنده‌شان استفاده می‌شود. لذا لازم است تا کابر از تاثیرات کوپلنت روی نتایج آزمایش آگاهی‌های لازم را داشته باشد. او عنوان کرد که کوپلنت‌ها معمولاً از مواد روغنی بر پایه گلیسیرین تشکیل میشوند که سرعت صوت در آنها حدوداً ۱۷۰۰ m/s است بنابراین اگر در ضخامت کوپلنت تنها ۰/۱ میلی‌متر تغییر به وجود بیاید در نتیجه اندازه‌گیری زمان پرواز (Time-of-Flight)، ۶ نانو ثانیه اختلاف بوجود خواهد آمد. این در حالیست که کاربر تغییرات زمان پرواز را ناشی از حضور تنش در قطعه برآورد خواهد کرد [11].

جوادى و همکاران طی تحقیقاتی که انجام دادند برای فولاد آستنیتی L۳۰۴ ضریب آکوستوالاستیسیته را بدست آوردند و با داشتن این ضریب و استفاده از امواج طولی با زاویه شکست بحرانی توانستند در نمونه‌هایی که با روش تیگ جوشکاری شده بودند و قطعه کارها بصورت همجنس و غیرهمجنس بودند، تنش را تا عمق معینی نسبت به سطح نمونه مد نظرشان بررسی نمایند. در آزمایشاتی که انجام دادند، دو روش تماسی و روش غوطه‌وری را با هم مقایسه کردند و در نتایج کارشان مزایا و معایب هر روش را نیز عنوان کردند. همچنین نتایج بدست آمده را با نتایج روش کرنش سنجی سوراخ، مقایسه کردند و اعلام داشتند که نتایج حاصل از دو روش مطابقت خوبی با هم دارند [12, 13].

لیو و دانگ ضریب آکوستوالاستیک را برای آلیاژ Fe۳۱۴ که با استفاده از فرآیند روکش‌کاری لیزری (Laser Cladding) پوشش داده شده بود را محاسبه کردند [14].

وانگ و همکاران مقادیر تنش صفحه‌ای را برای نمونه کریستالی با ضریب آکوستوالاستیک مشخص، با استفاده از موج LCR و روش همبستگی تصاویر دیجیتال (Digital Image Correlation Method) برای یک نمونه کریستالی محاسبه کردند و اعلام کردند که نتایج حاصل از هر دو روش تطابق خوبی با یکدیگر قرار داشتند [15].

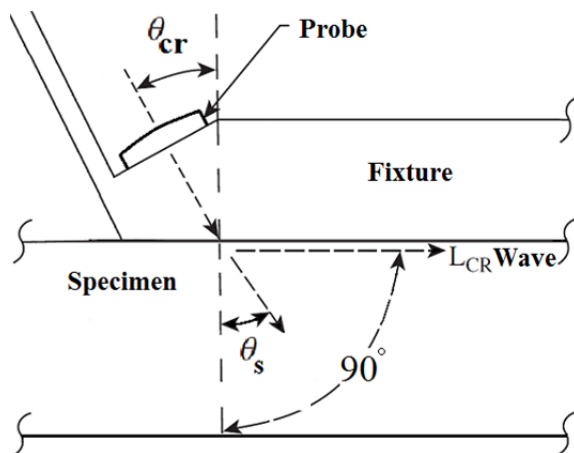
همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده به این موج طولی شکسته شده، که در قطعه کار انتشار می یابد، موج طولی با زاویه شکست بحرانی می گویند.



شکل ۱) ابعاد نمونه بر اساس استاندارد ASTM E8/E8M

جدول ۱) نتایج تحلیل کوانتومتری (بر حسب درصد)

| عنصر | درصد مقدار تشکیل دهنده | عنصر | درصد مقدار تشکیل دهنده |
|------|------------------------|------|------------------------|
| Fe   | >۹۸/۰۰                 | Nb   | <۰/۰۰۲۰                |
| C    | ۰/۰۹                   | Ti   | <۰/۰۰۲۰                |
| P    | ۰/۰۲۹                  | V    | <۰/۰۰۲۰                |
| S    | ۰/۰۱۹۳                 | W    | <۰/۰۰۱۵۰               |
| Si   | ۰/۱۶۰                  | Zr   | ۰/۰۰۲۳                 |
| Mn   | ۰/۵۵۹                  | Pb   | <۰/۰۰۲۵۰               |
| Cr   | ۰/۰۷۸                  | Sn   | ۰/۰۰۶۰                 |
| Mo   | ۰/۰۰۷۳                 | As   | ۰/۰۰۷۸                 |
| Ni   | ۰/۰۰۵۷                 | Bi   | >۰/۲۱۰                 |
| Al   | ۰/۰۳۴۵                 | Ca   | >۰/۰۰۱                 |
| Co   | ۰/۰۰۴                  | B    | ۰/۰۰۱۳                 |



شکل ۲) نمایی از انتشار امواج

بمنظور بهره جستن از روش اولتراسونیک، در این آزمون از یک جفت پروپ تماسی تولیدکننده امواج طولی با فرکانس ۲/۲۵ مگاهرتز، با اندازه قطر نامی ۱۰ میلی متر که ساخت شرکت سوناتست بودند و دستگاه اولتراسونیک ساخت شرکت استارمنز استفاده شد. برای آزمون مورد نظر سرعت امواج طولی را در حالت بدون تنش برای ماده اول که همان نگهدارنده اولتراسونیک بود و آلیاژ پایه آهن اندازه گیری شد که مقادیر آن در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

جدول ۲) سرعت اولیه امواج اولتراسونیک

| ماده                            | سرعت اولیه موج طولی (m/s) |
|---------------------------------|---------------------------|
| آلیاژ فولادی                    | ۵۸۶۳                      |
| پلی متیل متا کریلات (پلکسی گلس) | ۲۷۷۴                      |

نسبت تغییرات سرعت امواج اولتراسونیک به تغییرات کرنش صورت گرفته در هر قطعه را ضریب آکوستوالاستیک می نامند که مقدار آن در معادلات ۱۰ الی ۱۴ بصورت  $L_{ij}$  نشان داده شده است. با استفاده از معادله ۱۰ و بسته به اینکه در آزمون اولتراسونیک مقدار سرعت و یا زمان پرواز موج اندازه گیری می شود، می توان مقدار تنش را بر حسب سرعت و یا زمان پرواز موج بصورت معادلات ۱۵ و ۱۶ محاسبه کرد [5].

$$d\sigma = \frac{E(dV_{11}/V_{11}^0)}{L_{11}} \quad (15)$$

$$d\sigma = \frac{E(dt/t_0)}{L_{11}} \quad (16)$$

$\sigma$  مقدار تنش،  $E$  بعنوان مدول الاستیسیته ماده که از نتایج حاصل از آزمون کشش تک محوره محاسبه می شود و  $L$  همان ضریب آکستوالاستیک است که برای هر ماده منحصر بفرد است و باید بصورت مجزا اندازه گیری شود. اندیس ۰ در روابط یاد شده نشان دهنده حالتی است که هنوز قطعه کار مورد نظر، تحت تنش قرار نگرفته است و نمایانگر مقادیر حالت بدون تنش است.

### ۳- روش تحقیق و تجهیزات اندازه گیری تنش

#### ۳-۱- آماده سازی نمونه ها

برای این پژوهش از ۳ قطعه برای انجام تست کالیبراسیون براساس دستورالعملی که در استاندارد ASTM E8/E8M بیان شده [17] و با ابعادی که در شکل ۱ نشان داده شده و با استفاده از فرایند واترجت، نمونه سازی شد تا در اثر برش تنش های موجود در ورق نسبت به حالت اولیه تغییر چندانی پیدا نکند.

#### ۳-۲- آزمون کوانتومتری

همچنین در این تحقیق از ورقی که از جنس آلیاژ پایه آهن بود استفاده شد. ولی با توجه به اینکه ضریب آکوستوالاستیکی که بدست خواهد آمد منحصر به این فلز است، لازم بود تا مشخصات عناصر تشکیل دهنده آن مشخص باشد. بمنظور تعیین درصد عناصر تشکیل دهنده آلیاژ آهن، آزمون کوانتومتری روی ورق مورد نظر انجام شد که عناصر سازنده آن در جدول ۱ ارائه شده است.

#### ۳-۳- طراحی نگهدارنده

برای ساخت نگهدارنده ای که پروپ های اولتراسونیک درون آن جای بگیرند علاوه بر محاسبه زاویه بحرانی، باید اندازه میدان نزدیک و همچنین حداقل فاصله قابل قبول بین دو پروپ فرستنده و گیرنده محاسبه گردد.

#### ۳-۳-۱- زاویه بحرانی

در صورتی که امواج التراسونیک قرار باشد از دو ماده مختلف که سرعت عبور صوت در آنها متفاوت است، انتشار یابد، پس از گذشتن از ماده ای اول که در اینجا همان نگهدارنده اولتراسونیک از جنس پلی متیل متا کریلیت می باشد و قبل از ورود به ماده دوم که همان قطعه کار است و با رسیدن به مرز مشترک بین دو ماده، دسته ای از امواج شکسته و دسته ای هم بازتابیده خواهند شد که زوایای شکست و بازتاب را می توان با توجه به قانون اسنل (معادله ۱۷) محاسبه کرد. با استفاده از این قانون نسبت سینوس زاویه تابش  $\theta_I$  به سینوس زاویه شکست و یا بازتابش  $\theta_R$  با نسبت سرعت های صوت در ماده اول (سرعت امواج تابشی)  $V_I$ ، به سرعت صوت ماده دوم (سرعت امواج شکسته شده)  $V_R$  برابر است [6].

$$\frac{\sin \theta_I}{\sin \theta_R} = \frac{V_I}{V_R} \quad (17)$$

زاویه شکست موج عرضی درون نمونه طبق معادله ۲۳ بدست آمد.

$$\frac{\sin \theta_R}{V_R} = \frac{\sin \theta_s}{V_s} \quad (22)$$

$$\frac{\sin 90}{5863} = \frac{\sin \theta_s}{3279} \Rightarrow \theta_s = 34 \quad (23)$$

با مشخص شدن زاویه شکست موج عرضی، اندازه  $a$ ،  $b$  و  $s$  که در شکل ۲ مشخص شد با استفاده از روابط مثلثاتی، معادلات ۲۴ الی ۲۹ محاسبه گردید.

$$\tan \theta_s = \frac{a}{b} \quad (24)$$

$$a = b \tan \theta_s \quad (25)$$

$$\cos \theta_s = \frac{b}{S} \quad (26)$$

$$b = t \Rightarrow \frac{t}{S} = \frac{12}{S} = \cos 34 \Rightarrow S = 14.475 \quad (27)$$

$$\sin \theta_s = \frac{a}{S} \quad (28)$$

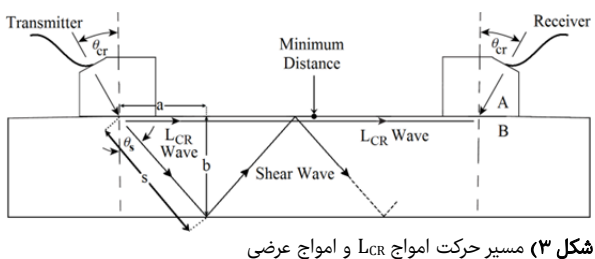
$$a = S \sin \theta_s \Rightarrow a = (14.475) \sin 34 \quad a = 8.094 \quad (29)$$

در معادله ۲۷،  $t$  ضخامت قطعه است. با داشتن مقدار  $a$ ، حداقل فاصله بین دو پروب یا همان  $D_{min}$  طبق معادله ۳۱ بدست آمد.

$$D_{min} = 2a \quad (30)$$

$$2a = 2t \tan \theta_s = 2 \times 12 \times \tan 34 = 16.19 \text{ [mm]} \quad (31)$$

با توجه به اندازه‌های بدست آمده برای زاویه بحرانی  $\theta_{cr} = 28/24$ ، طول میدان نزدیک برحسب میلی‌متر  $X = 20/28$  و حداقل فاصله بین دو پروب فرستنده و گیرنده برحسب میلی‌متر  $D_{min} = 16/19$  بود. نگهدارنده‌ای برای پروب فرستنده و گیرنده ساخته شد تا پروب‌های اولتراسونیک را در مکانی ثابت نگه دارد و همچنین امواج اولتراسونیک را بصورت امواج  $L_{CR}$  به داخل قطعه که روی آن قرار می‌گیرید، ارسال کند. از آنجا که برای تولید موج  $L_{CR}$  باید نگهدارنده در تماس کامل با سطح قطعه کار باشد و عواملی که در طی فرآیندهای مختلف تولید، سبب زبر شدن سطح قطعه کار می‌شوند مانع این تماس کامل می‌شوند. از مایعی بنام کویلنت که معمولاً از مواد روغنی برپایه گلیسیرین هستند بمنظور پرکردن فضای خالی در بین سطح نگهدارنده و سطح قطعه کار و همچنین بین سطح تماس پروب با نگهدارنده استفاده شد. وجود هر گونه تغییر در ضخامت کویلنت سبب تغییر در زمان پرواز موج و بروز خطا در نتایج اندازه‌گیری می‌شود که برای جلوگیری از روی دادن این اتفاق، همانطور که در شکل ۴ هم نشان داده شده از فنر استفاده شد تا با فشاری یکنواخت روی پروب‌ها ضخامت کویلنت بین سطح پروب‌ها و نگهدارنده در زمان انجام آزمون تغییر نکند و همچنین خود نگهدارنده نیز با گیره روی قطعه کار محکم بسته شد تا ضخامت کویلنت بین قطعه و نگهدارنده نیز حین آزمایش بدون تغییر باقی بماند.



شکل ۳ مسیر حرکت امواج  $L_{CR}$  و امواج عرضی

برای یافتن زاویه بحرانی اول و ایجاد موجی که به موازات سطح در ماده دوم عبور کند از معادله ۱۷ استفاده شد و زاویه تابش بصورت معادله ۱۸ محاسبه شد تا موج طولی با زاویه ۹۰ درجه شکسته شود.

$$\theta_{cr} = \sin^{-1}(V_L/V_R) = \sin^{-1}(2774/5863) = 28.24 \quad (18)$$

### ۳-۳-۲- میدان نزدیک

با اندازه‌گیری شدت صوت در نزدیکی پروب فرستنده، توزیعی نامنظم از شدت صوت در این منطقه مشاهده می‌شود چرا که ساختار پروب‌ها متشکل از قرارگیری چندین بلوره پیزوالکتریک است که هر یک از آنها اختلاف فاز کمی با بلوره‌های مجاور خودشان دارند و امواج انتشار یافته از هر یک از این بلوره‌ها با هم برخورد کرده و سبب ایجاد توزیع نامنظم شدت صوت در نزدیک سطح پروب می‌شوند. لذا لازم است تا بررسی‌ها بعد از این فاصله صورت پذیرد. طول منطقه نزدیک با اندازه قطر نامی پروب رابطه مستقیم و با طول موج رابطه معکوس دارد و از آنجایی که برای یک ماده مشخص طول موج با فرکانس نسبت معکوس دارد، با کم کردن فرکانس، طول منطقه نزدیک کاهش می‌یابد.

$$X = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (19)$$

در معادله ۱۹ طول منطقه نزدیک را با  $X$  نشان می‌دهند،  $D$  اندازه ویفر پروب اولتراسونیک و  $\lambda$  اندازه طول موج در ماده اول (همان پلی متیل متا کریلات یا پلکسی گلس) می‌باشد، که با بدست آوردن مقدار طول موج از معادله ۲۰ و قرار دادن آن در معادله ۱۹، طول منطقه نزدیک محاسبه می‌شود.

$$\lambda = \frac{V_L}{f} \quad (20)$$

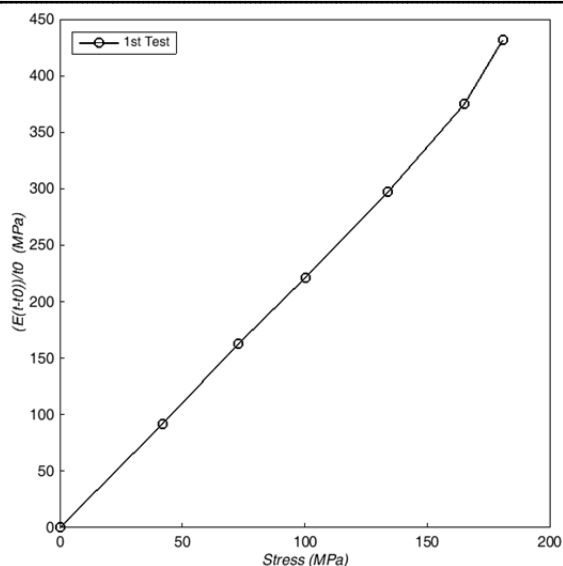
$f$  در رابطه بالا فرکانس است. با محاسبه مقدار طول موج از معادله ۲۰ و قراردادن آن در معادله ۱۹، طول منطقه نزدیک طبق معادله ۲۱ قابل محاسبه خواهد بود.

$$X = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 f}{4V_L} = 20.28 \text{ [mm]} \quad (21)$$

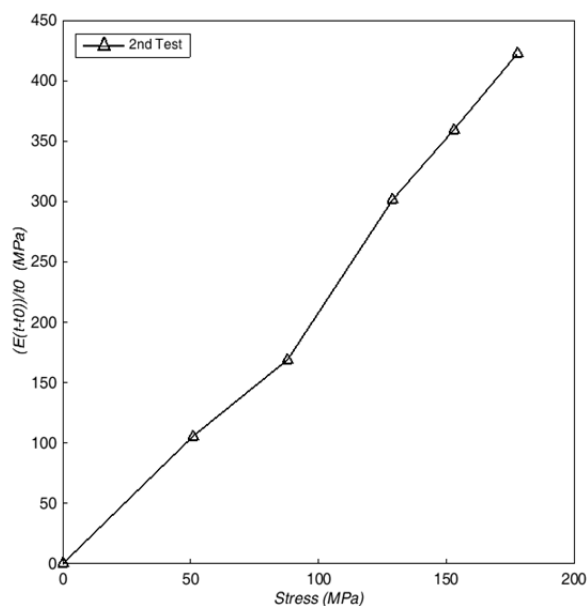
### ۳-۳-۳- حداقل فاصله بین دو پروب

یکی دیگر از عواملی که برای طراحی نگهدارنده باید محاسبه شود، بدست آوردن مقدار حداقل فاصله بین پروب فرستنده و پروب گیرنده است. ضروریست که طراح، درک درستی از رفتار موج درون قطعه داشته باشد تا بتواند با تحلیل و پیش‌بینی مسیر حرکت موج عرضی و موج  $L_{CR}$  حداقل فاصله بین دو پروب را تعیین کند. همانطور که در بخش (۳-۳-۱) نیز اشاره شد، موج طولی که تحت زاویه بحرانی به مرز بین دو ماده برخورد کند پس از شکست، در ماده دوم بصورت موج طولی با زاویه شکست بحرانی و موج عرضی درآمده و با دانش به اینکه موج  $L_{CR}$  در عمق مشخصی از سطح حرکت می‌کند و موج عرضی تولید شده در ضخامت قطعه به حرکت درمی‌آید، با برخورد به انتهای قطعه، بازتابیده می‌شود و باز به سمت سطح قطعه حرکت می‌کند. بنابراین همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده مکان پروب گیرنده باید در جایی قرار گیرد که موج عرضی پس از برخورد به طرف دیگر قطعه حداقل یک مرتبه به سطح نمونه مورد آزمایش بازگردد.

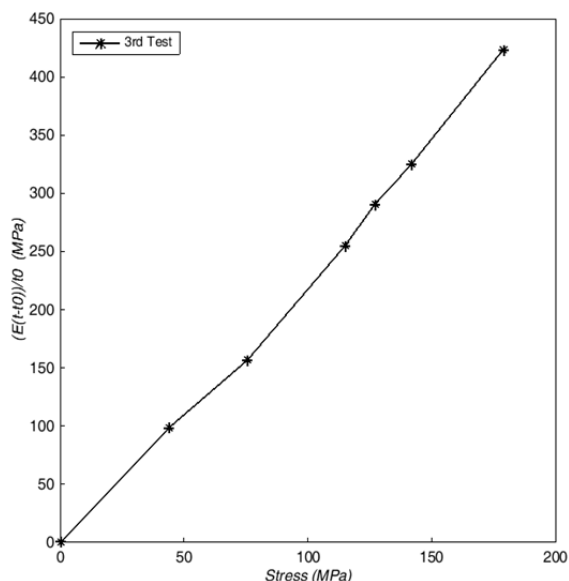
برای تعیین حداقل فاصله بین پروب‌ها، سرعت موج عرضی درون قطعه یا  $V_s$  برابر با ۳۲۷۹ اندازه‌گیری شد. استفاده از قانون اسنل،



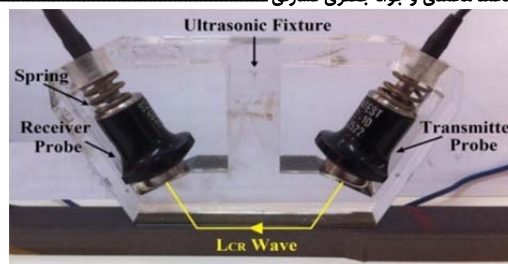
نمودار (۲) نتایج حاصل از اولین آزمون تجربی



نمودار (۳) نتایج حاصل از دومین آزمون تجربی



نمودار (۴) نتایج حاصل از سومین آزمون تجربی



شکل (۴) جانمایی قرارگیری پروب‌ها و نگهدارنده روی قطعه

#### ۴- نتایج آزمون

همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است با استفاده از دستگاه کشش تک‌محوره درون قطعه مورد نظر مقادیری از تنش ایجاد گردید. همزمان با اعمال تنش مقادیر زمان پرواز موج اندازه‌گیری شده توسط دستگاه اولتراسونیک نیز ثبت شد. این آزمون دو بار دیگر هم تکرار و در مجموع داده‌های حاصل از هر سه آزمون در جدول ۳ ارایه شد.

با داشتن مقادیر زمان پرواز موج در حالت بدون تنش و همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده در زمان اعمال تنش کششی، نموداری بر حسب تنش و تغییرات زمان پرواز موج با اعمال خواص مکانیکی، برای هر سه آزمون انجام شده در نمودارهای ۲ تا ۴ رسم گردید. در نمودار ۵ نمودارهایی که با استفاده از داده‌های حاصل از سه آزمون در نمودارهای ۲ تا ۴ نشان داده شد، مجدداً رسم گردید و نموداری بعنوان میانگین مجموعه آنها رسم شد و سپس خطی بر آن برازش شد که شیب معادله خط برازش شده، همان ضریب آکوستوالاستیک برای آلیاژی بود که در این آزمون مورد استفاده قرار گرفته شده بود.

جدول (۳) مقادیر زمان پرواز موج و تنش متناظر

| آزمون اول |         | آزمون دوم |         | آزمون سوم |         |
|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| T (ns)    | σ (MPa) | T (ns)    | σ (MPa) | T (ns)    | σ (MPa) |
| ۲۹/۶۹     | ۰       | ۳۹/۷۴     | ۰       | ۳۶/۱۹     | ۰       |
| ۲۹/۷۰     | ۴۲      | ۳۹/۷۶     | ۵۱      | ۳۶/۲۰     | ۴۴      |
| ۲۹/۷۱     | ۷۲/۹    | ۳۹/۷۷     | ۸۸      | ۳۶/۲۱     | ۷۵/۶۴   |
| ۲۹/۷۲     | ۱۰۰     | ۳۹/۷۹     | ۱۲۹     | ۳۶/۲۳     | ۱۱۵/۱۹  |
| ۲۹/۷۳     | ۱۳۴     | ۳۹/۸۰     | ۱۵۳     | ۳۶/۲۴     | ۱۲۶/۹۷  |
| ۲۹/۷۴     | ۱۶۵/۲   | ۳۹/۸۲     | ۱۷۸     | ۳۶/۲۵     | ۱۴۱/۸۸  |
| ۲۹/۷۵     | ۱۸۰/۸   | -         | -       | ۳۶/۲۶     | ۱۷۹     |



شکل (۵) تجهیزات مورد استفاده در آزمایش

استفاده گسیل داده شده بود، از میزان تنش‌های طولی بوجود آمده درون جسم تاثیر می‌پذیرد و بدین ترتیب با اندازه‌گیری‌های صورت‌گرفته برای آلیاژ فلزی پایه آهن مورد استفاده در این آزمایش ضریب آکوستوالاستیک برای آلیاژ مذکور برابر با  $2/3798$  محاسبه گردید تا از این پس بتوان برای نمونه‌هایی با خواص کوانتومتری یکسان با مقادیر ارائه شده در جدول ۱ و با استفاده از این ضریب آکوستوالاستیک میزان تنش در ناحیه الاستیک را تنها با محاسبه زمان پرواز موج توسط دستگاه اولتراسونیک محاسبه کرد.

**تشکر و قدردانی:** احتراماً بر خود لازم میدانیم بدین وسیله از همکاری مسئولین آزمایشگاه خواص مکانیکی و همچنین مسئولین مرکز تحقیقات فناوری‌های نوین ساخت و تولید (گروه پژوهشی مواد و سازه‌های هوشمند) واقع در دانشگاه آزاد نجف آباد و همچنین از حسن همکاری مهندس پژوهشگر، جعفرزاده‌کاشی و شهریار مراتب تشکر و قدردانی خودمان را اعلام نماییم.

**تاییدیه اخلاقی:** نویسندگان متعهد می‌شوند که نتایج این مقاله در مجله دیگری چاپ نشده است یا در حال داوری نیست.

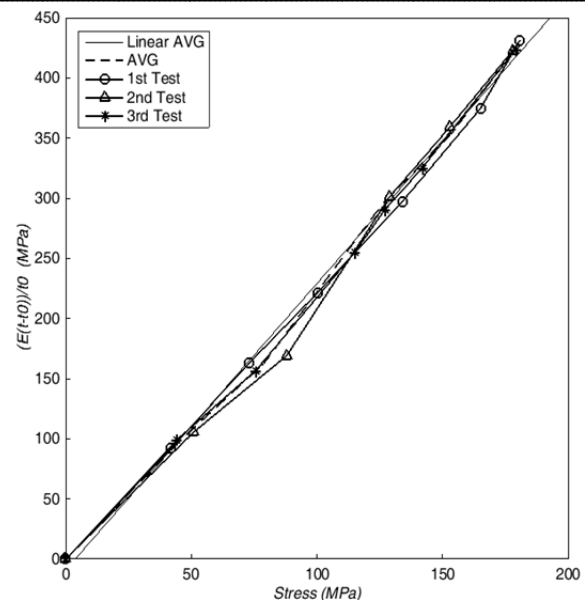
**تعارض منافع:** هر دو نویسنده منافع یکسانی از این مقاله دارند.

**سهم نویسندگان:** محمد محمدی (نویسنده اول) پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ جواد جعفری فشارکی (نویسنده دوم) پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛

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

## منابع

- 1- Murnaghan FD. Finite deformations of an elastic solid. American Journal of Mathematics. 1937;59(2):235-260.
- 2- Treuting RG, Read Jr WT. A mechanical determination of biaxial residual stress in sheet materials. Journal of Applied Physics. 1951;22(2):130-134.
- 3- Hughes DS, Kelly JL. Second-order elastic deformation of solids. Physical Review. 1953;92(5):1145-1149.
- 4- Clotfelter WN, Risch E. Ultrasonic measurement of stress in railroad wheels and in long lengths of welded rail. NASA Technical Memorandum Report. Washington: NASA; 1974 Jul. Report No: NASA TN X -64863.
- 5- Egle DM, Bray DE. Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel. The Journal of the Acoustical Society of America. 1976;60(3):741-744.
- 6- Tanala E, Bourse G, Fremiot M, De Belleval JF. Determination of near surface residual stresses on welded joints using ultrasonic methods. NDT & E International. 1995;28(2):83-88.
- 7- Santos AA, Bray DE, Caetano SF, Andrino MH, Trevisan RE. Evaluation of the rolling direction effect in the acoustoelastic properties for API 5L X70 steel used in pipelines. ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Recent Advances in Nondestructive Evaluation Techniques for Material Science and Industries. New York: ASME; 2004. pp. 85-90.
- 8- Abdul Aziz S, Lucas M. The effect of ultrasonic excitation in metal forming tests. Applied Mechanics and Materials. 2010;24-25:311-316.
- 9- Ya M, Marquette P, Belahcene F, Lu J. Residual stresses in laser welded aluminium plate by use of ultrasonic and optical methods. Materials Science and Engineering: A. 2004;382(1-2):257-264.
- 10- Zhang J, Drinkwater BW, Wilcox PD, Hunter AJ. Defect detection using ultrasonic arrays: The multi-mode



نمودار ۵) نمودار محاسبه ضریب آکوستوالاستیک

معادله خط برازش‌شده از منحنی میانگین داده‌ها در معادله ۳۲ بیان شده است.

$$y = 2.3798x - 8.97 \quad (32)$$

## ۵- بحث روی نتایج

با توجه به داده‌های ارائه‌شده در جدول ۳، رابطه زمان پرواز موج بر حسب تنش که شامل ضریب آکوستوالاستیک برابر با  $2/3798$  بود را برای آلیاژ با مشخصات عناصر یادشده می‌توان استفاده کرد. همچنین از نمودارهای ۲ تا ۴ اینگونه برداشت می‌شود که با افزایش میزان تنش در جسم، زمان پرواز موج اولتراسونیک از پروپ فرستنده تا پروپ گیرنده افزایش داشته است و با توجه به نتایج این آزمون که در نمودار ۵ آورده شد و نتایج کار/ریگل و بری که پیش‌تر در نمودار ۱ آورده شد و در آن بیان شده که با افزایش تنش یا کرنش، سرعت موجی که جهت انتشار آن در قطعه و جهت لرزش ذرات در آن بموازات یکدیگر باشند در جسم کاهش می‌یابد، از طرفی چون زمان با سرعت رابطه عکس دارند، پس می‌توان به این نتیجه رسید که با کاهش سرعت موج، زمان پرواز آنها افزایش خواهد داشت. بنابراین با توجه به این مهم که در این آزمون امواج اولتراسونیک در جهت اعمال بار انتشار یافتند و جهت پلاریزاسیون هم بموازات جهت انتشار بود، نتایج گرفته شده مبنی بر افزایش زمان پرواز موج در بررسی که صورت پذیرفت با نتایج کار ایگل و بری مطابقت دارد و ضریب آکوستوالاستیک بدست آمده از این نتایج قابل اعتماد خواهد بود.

## ۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله رابطه بین زمان پرواز موج طولی با زاویه شکست بحرانی و تنش ناشی از کشش تک‌محوره برای یک آلیاژ فلزی که عناصر تشکیل‌دهنده آن توسط آزمون کوانتومتری مشخص شد، مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور برای اینکه موج طولی انتشاریافته از پروپ‌ها به موج  $L_{CR}$  تبدیل و به درون قطعه کار وارد شود، برای پروپ‌های اولتراسونیک نگهدارنده‌ای تحت زاویه‌ای خاص، براساس قانون اسنل طراحی و آماده شد. با بررسی داده‌های حاصل از آزمون می‌توان به این نتیجه رسید که زمان پرواز موج  $L_{CR}$  که هم جهت و بموازات میدان تنش اعمالی درون آلیاژ مورد

coating with critically refracted longitudinal wave based on cross correlation function. *Applied Acoustics*. 2016;101:98-103.

15- 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.

16- 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.

17- ASTM International. ASTM E8 / E8M - 09, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Internet]. West Conshohocken: ASTM International; 2009 [Unknown cited]. Available from: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/E8E8M-09.htm>.

total focusing method. *NDT & E International*. 2010;43(2):123-133.

11- Schajer GS. Relaxation methods for measuring residual stresses: Techniques and opportunities. *Experimental Mechanics*. 2010;50(8):1117-1127.

12- Javadi Y, Salimi Pirzaman H, Hadizadeh Raeisi M, Ahmadi Najafabadi M. Ultrasonic inspection of a welded stainless steel pipe to evaluate residual stresses through thickness. *Materials & Design*. 2013;49:591-601.

13- Javadi Y, Plevris V. Evaluation of welding residual stress in stainless steel pipes by using the LCR ultrasonic waves. 3<sup>rd</sup> South-East European Conference on Computational Mechanics ECCOMAS and IACM Special Interest Conference, Kos Island, Greece, 12-14 June 2013. Unknown city: Unknown Publisher; 2013. pp. 1-11.

14- Liu B, Dong S. Stress evaluation of laser cladding