ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir



تغییرات سرعت امواج فراصوتی طولی در حضور یک گرادیان درجه حرارت، بخش دوم: آزمایشهای تجربی و تحلیل عدمقطعیت

ر امین شیعیانی¹، فرهنگ هنر و ر^{2*}

1 – كارشناسىارشد، مهندسى مكانيك، دانشگاه صنعتى خواجه نصيرالدين طوسى، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستى honarvar@kntu.ac.ir ، 19395-1999

| چکیدہ | اطلاعات مقاله |
|--|--|
| | مقاله پژوهشی کامل دریافت: 05 بهمن 1394 |
| متالورژیکی مواد و دماسنجی دارد. در بخش نخست این مقاله، معادلات تئوری و تحلیل اجزا محدود چگونگی تغییر سرعت امواج فراصوتی در | پذیرش: 09 اسفند 1394 ارائه در سایت: 07 فروردین 1395 |
| حضور گرادیان درجه حرارت ارائه شد. در این بحش به بررسی اتر گرادیان درجه حرارت بر سرعت امواج فراصوتی طولی بهصورت تجربی پرداخته میشود. برای انجام آزمایش های تجربی دستگاهی خاص طراحی و ساخته شده است. این دستگاه شرایط توزیع دمای مناسب و شرایط ارسال و | <i>کلید واژگان:</i> امواج فراصوتی حجمی طولی |
| دریافت امواج فراصوتی حجمی طولی را بهصورت همزمان ایجاد میکند. 12 آزمایش برای بررسی اثر طول نخستین قطعه و دماهای بیشینه و کمینه در قطعه انجام شد. نتایج حاصل از آزمایشها با نتایج تئوری مقایسه و تطابق بسیار خوبی میان نتایج تئوری و تجربی مشاهده شد. تحلیل | گرادیان درجه حرارت روش تجربی |
| عدم قطعیت اندازهگیری سرعت امواج فراصوتی طولی در حضور گرادیان درجه حرارت صورت گرفت و منابع خطا در اندازهگیری سرعت امواج فراصوتی شناسایی شد. در آزمایش های انجامشده، عدم قطعیت اندازهگیری سرعت صوت 4.5 m/s بوده است. | تحليل عدم قطعيت |

Variation of Longitudinal Ultrasonic Wave Velocity in the Presence of a Thermal Gradient; Part 2: Experimental Study and Uncertainty Analysis

Ramin Shabani, Farhang Honarvar^{*}

Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran * P.O.B. 193951999 Tehran. Iran. honarvar@kntu.ac.ir

| ARTICLE INFORMATION | ABSTRACT |
|--|---|
| Original Research Paper Received 25 January 2016 Accepted 28 February 2016 Available Online 26 March 2016 | It is essential to inspect manufactured and in-service machines and products. Many different nondestructive testing (NDT) methods are currently in use for this purpose. Ultrasonic testing is one of the most important of these NDT methods. Ultrasonic testing has different applications including defect detection, assessment of mechanical and metallurgical properties of materials and temperature |
| Keywords: Longitudinal Ultrasonic Bulk Waves Thermal Gradient Experimental Method Uncertainty Analysis | measurement. In the first part of this paper, theoretical equations and finite element analysis of variations of longitudinal ultrasonic wave velocity in the presence of a thermal gradient were studied. In the second part, the effect of a thermal gradient on the longitudinal ultrasonic wave velocity is investigated by experiments. A specific test rig is designed and fabricated for this purpose. This test rig is capable of providing the desired temperatures and transmit and receive ultrasonic bulk waves simultaneously. Twelve different tests were conducted in order to study the effects of the work piece length and maximum and minimum temperatures. The experimental results are compared with the theory under similar conditions and very good agreement is observed. Uncertainty analysis is incorporated for determining the uncertainty in measuring the ultrasonic wave velocity in the presence of a thermal gradient and identifying the sources of errors. The measurements were found to be quite accurate with an uncertainty of 4.5 m/s. |

1 - مقدمه

ويسكوزيته سيالات غيرنيوتونى به وسيله امواج فراصوتى هدايت شده ارائه کردند. بورگس و همکارانش [3] روش جدید پمپ- کاوند^ا ترکیبشده با حرارتدهی لیزری را برای اندازه گیری سرعت امواج فراصوتی ریلی در دمای بالا توسعه دادند. مزیت این روش در تعیین خواص الاستیک نمونههای در

امروزه آزمون فراصوتی یک روش ارزیابی غیرمخرب رایج است. امواج فراصوتی می توانند در مواد جامد، مایع و هوا انتشار یابند. این امواج دارای کاربردهای متعددى مانند ضخامتسنجى، عيبيابى و تعيين برخى خواص الاستيك هستند [1]. کازیاس و همکارانش [2] روش جدیدی برای اندازه گیری

¹ Pump-probe

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

R. Shabani, F. Honarvar, Variation of Longitudinal Ultrasonic Wave Velocity in the Presence of a Thermal Gradient; Part 2: Experimental Study and Uncertainty Analysis, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 4, pp. 10-16, 2016 (in Persian)

ابعاد میکرون است. با اندازه گیری سرعت امواج فراصوتی طولی و عرضی در دمای بالا میتوان خواص الاستیک مواد را با دقت بالا و بهصورت غیرمخرب در دمای بالا بهدست آورد [4]. هنرور و طاهری [5] تحلیل کاملی از پراکندگی چندگانه امواج الاستیک در مواد مرکب فیبری تک جهت تحت تابش قائم و مایل امواج طولی و عرضی با درنظر گرفتن اثرات میرایی در ماده زمینه و در نظر گرفتن استوانهها بهصورت همسان گرد و همسان گرد عرضی ارائه کردند. آنها نتایج تئوری بهدستآمده را با نتایج تجربی مقایسه کردند. یکی از کاربردهای مهم اندازه گیری سرعت امواج فراصوتی در ضخامت سنجی و در نتیجه تعیین خوردگی در لولههاست [6]. در اغلب موارد دمای قطعه برای ضخامت سنجی ثابت فرض می شود. این موضوع در برخی موارد سبب ایجاد خطا در اندازه گیری ضخامت میشود.

در بخش نخست این مطالعه [7]، به بررسی تئوری و عددی موضوع تغییرات سرعت امواج فراصوتی حجمی طولی در حضور گرادیان درجه حرارت پرداخته شد. در این مقاله، تغییرات سرعت امواج فراصوتی حجمی طولی در حضور یک گرادیان درجه حرارت بهصورت تجربی بررسی میشود. برای این منظور دستگاهی طراحی و ساخته شد تا بتوان شرایط دمایی مناسب را جهت مقایسه اثر گرادیان درجه حرارت بر سرعت امواج فراصوتی حجمی طولی بهصورت تئوری و تجربی ایجاد کند. برای انجام این مقایسه با توجه به محدودیتهای دستگاه ساخته شده، 12 حالت آزمایش انجام شد، همچنین برای بررسی دقت اندازه گیری منابع خطا شناسایی شدند و عدم قطعیت اندازه گیری بهصورت استاندارد تعیین شد.

2- طراحي و ساخت دستگاه

برای انجام آزمایشها نیاز به دستگاهی است که بتواند هم شرایط دمایی مورد نیاز را ایجاد کند و هم بتواند امکان ارسال و دریافت امواج فراصوتی حجمی طولی را ممکن سازد. برای ایجاد شرایط دمایی مورد نظر، سیستم سرمایش و گرمایش مورد نیاز است. از سوی دیگر به دلیل قرار گرفتن تراگذار¹ فراصوتی در بین سیستم سرمایش، این سیستم باید به گونهای طراحی شود که امکان قرار گرفتن تراگذار و همچنین امکان ارسال و دریافت امواج فراصوتی فراهم شود. برای تنظیم موقعیت اجزا دستگاه و قطعه قید و بند² طراحی شد تا ضمن تنظیم موقعیت سیستمهای سرمایش و گرمایش، قابلیت تنظیم ارتفاع را نیز داشته باشد و در نتیجه امکان انجام آزمایش برای قطعههای با طولهای مختلف را فراهم سازد. شکل 1 نمایی از قید و بند ساخته شده را نشان میدهد.

برای جلوگیری از انتقال حرارت بین سیستم گرمایش و قسمت پایینی قید و بند از آجر نسوز و عایق پشم شیشه استفاده شده است.

1-2- سيستم سرمايش

در طراحی سیستم سرمایش ملاکهای متعددی درنظر گرفته شد. این ملاکها شامل هزینه ساخت، امکان استفاده از این سیستم در محیط آزمایشگاه، کنترلپذیری آسان و سرعت خنککنندگی و به تعادل حرارتی رساندن قطعههاست. سیستم سرمایش باید به گونهای باشد که امکان ارسال و دریافت امواج فراصوتی را فراهم کند. پس از بررسیهای اولیه و براساس ملاکهای یادشده، آب بهترین گزینه جهت سرمایش تعیین شد. در شکل 2 نمایی کلی از سیستم سرمایش نشان داده شده است.

¹ Transducer ² Fixture



Fig. 1 Fixture to adjust position and height of cooling system شکل 1 قید و بند طراحی و ساختهشده برای تنظیم موقعیت و تنظیم ارتفاع سیستم سرمایش



3. 2 Cooning system

یک مخزن آب ساخته شد و دو پمپ آب 18W برای ارسال آب به درون لولهها مورد استفاده قرار گرفت. به دلیل انعطاف پذیری لولههای پلاستیکی، از این لولهها برای ارسال جریان آب از مخرن به درون لولههای آلومینیم و سپس به خارج از موضع سرمایش استفاده شد. لولههای آلومینیوم به دور یک بوش آلومینیم پیچیده شدند. ابعاد بوش آلومینیم و لولههای آلومینیم در شکل 3 نشان داده شده است.

شكل 2 سيستم سرمايش

دلیل انتخاب آلومینیم برای جنس بوش قابلیت انتقال حرارت بالای آن است. در بوش آلومینیم سوراخی وجود دارد که محل قرار گرفتن تراگذار



Fig. 3 Aluminum bushing and aluminum pipes (dimensions are in mm) شکل 3 ابعاد بوش و لولههای آلومینیم (ابعاد به mm)

فراصوتی است. این سوراخ بازدهی سیستم سرمایش را افزایش میدهد. ضخامت کم این بوش آلومینیمی موجب تسریع در روند انتقال حرارت از بوش به لولهها و در نهایت به آب میشود.

تراگذار مورد استفاده از نوع پیزوالکتریک است و امواج فراصوتی حجمی طولی با فرکانس MHz تولید میکند. تراگذار مورد استفاده در دمای بالاتر از 333K خاصیت خود را از دست میدهد؛ بنابراین به یک کفشک^۱ برای جلوگیری از انتقال حرارت قطعه به تراگذار نیاز است. برای این منظور كفشكى از جنس پلكسى گلاس متناسب با ابعاد تراگذار و بوش ساخته شده است. این کفشک قابلیت انتقال امواج فراصوتی را دارد و همچنین بهعنوان عايق حرارت مانع از انتقال حرارت به تراگذار مي شود. شكل 4 كفشك ساخته شده را نشان میدهد.

سیستم سرمایش به نحوی طراحی شد تا علاوهبر خنککردن قطعه موجب خنک کردن کفشک نیز شود.

2-2- سیستم گرمایش

سیستم گرمایش از یک مدار کنترلکننده دما، دو حرارتدهنده² و یک دیسک فولادی تشکیل شده است. مدار کنترلکننده دما از اجزا الکتریکی متعدد، یک کنترل کننده دما و یک ترموکوپل نوع K تشکیل شده است. کنترل کننده دما می تواند دمای دیسک را در دمای مورد نظر به صورت ثابت نگه دارد. ترموکویل به این کنترلکننده متصل شده و قسمت حسگر آن به



Fig. 4 Wedge made for the transmission of ultrasonic waves شكل 4 كفشك ساخته شده براى انتقال امواج فراصوتي



Fig. 5 Temperature control circuit

شکل 5 مدار کنترل کننده دما

1 Wedge ² Heater

دیسک وصل است. دمای دیسک از طریق ترموکوپل به کنترلکننده دما منتقل می شود. مدار کنترل کننده دما در شکل 5 نشان داده شده است.

حرارتدهندهها نيز به كنترلكننده دما متصل مىشوند. قسمت توليد حرارت در درون دیسک قرار داده می شود. حرارت دهنده ها دارای توان 100W است. گرمای تولید شده از طریق حرارتدهندهها به دیسک انتقال مىيابد. شكل 6 وضعيت قرار گرفتن بوش ألومينيم، قطعه، تراگذار و ديسک فولادی را نشان میدهد.

مطابق شکل 6 حرارت از دیسک به قطعه فولادی و سپس به بوش آلومینیم منتقل میشود. دمای دیسک فولادی و دبی آب خروجی از لولههای آلومینیم ثابت است؛ بنابراین دمای دو سطح بالایی و پایینی قطعه ثابت شده و توزیع دما در قطعه به حالت تعادل می سد. از دو ترموکوپل نوع K نیز برای اندازه گیری دماهای دو سطح بالایی و پایینی قطعه در حالت تعادل استفاده می شود. نمای کلی دستگاه ساخته شده در شکل 7 نشان داده شده است.

2-3- اندازه گیری سرعت امواج فراصوتی

یس از ایجاد تعادل حرارتی مورد نظر در قطعه، تراگذار در محل مناسب قرار داده می شود و امواج به درون قطعه ارسال و سپس دریافت می شوند. شکل 8 نمونهای از سیگنالهای ثبتشده را نشان میدهد.

با توجه به نتایج تئوری [7]، سرعت امواج فراصوتی حجمی طولی C_m ، وابسته به جنس قطعه و دماهای دو انتهای قطعه (کمترین و بیشترین دما) است؛ بنابراین در آزمایشها جنس قطعه را تغییر نمیدهیم و پارامترهای متغیر در آزمایشها طول قطعه و دو دمای کمینه و بیشینه است. برای مقایسه نتایج تجربی با نتایج تئوری، سه نمونه از جنس فولاد St37 با قطر 25mm و با طول های مختلف ساخته شد. در 12 حالت مختلف آزمایش انجام



Fig. 6 Schematic of the test setup



Fig. 7 The test setup

شکل 7 دستگاه اندازه گیری

شکل 6 شماتیک دستگاه اندازه گیری

و اندازه گیریها در هر حالت 10 مرتبه تکرار شد. حالتهای مختلف در جدول 1 ارائه شده است. دمای محیط 295K است.

3- عدمقطعیت در اندازه گیری سرعت امواج فراصوتی در حضور گرادیان درجه حرارت

در فرایند اندازه گیری مقداری به یک کمیت نسبت داده می شود. خطای اندازه گیری همواره مخالف صفر است. برای بیان نتیجه اندازه گیری همواره نیاز به عبارتی به نام عدم قطعیت است. فرایند تحلیل عدم قطعیت چند متغیره شامل مراحل زیر است [8]:

- تعريف رابطه
- ایجاد مدل خطا
- ایجاد مدل عدمقطعیت
- تعیین خطاهای فرایند اندازه گیری
- تخمین عدمقطعیتهای فرایند اندازهگیری
 - محاسبه عدمقطعيت اجزا
 - تركيب اجزا عدمقطعيت

1-3- تعريف رابطه

سرعت امواج فراصوتی طولی در حضور گرادیان درجه حرارت به روش بازتابی از رابطه (1) بهدست میآید.

$$C_m = \frac{\mathbf{2}L_f}{t} \tag{1}$$



Fig. 8 Recorded signals in the presence of a thermal gradient شکل 8 سیگنال های ثبتشده در حضور گرادیان درجه حرارت

جدول 1 حالتهای مختلف در اندازه گیری سرعت C_m بهصورت تجربی Table 1 different condition in which velocity measurement were carried out

| سرعت | دمای بیشینه | دمای کمینه | طول اوليه | شماره |
|-------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|--------|
| C_m تئورى (m/s) | T ₂ (K) | <i>T</i> ₁ (K) | نمونه L ₀ (mm) | آزمایش |
| 5910.89 | 322 | 307 | 50.23 | 1 |
| 5900.59 | 353 | 320 | 50.23 | 2 |
| 5889.81 | 385 | 334 | 50.23 | 3 |
| 5877.84 | 420 | 350 | 50.23 | 4 |
| 5910.42 | 323 | 308 | 74.70 | 5 |
| 5900.12 | 356 | 319 | 74.70 | 6 |
| 5890.74 | 390 | 325 | 74.70 | 7 |
| 5881.58 | 423 | 343 | 74.70 | 8 |
| 5911.59 | 322 | 304 | 100.08 | 9 |
| 5901.76 | 354 | 314 | 100.08 | 10 |
| 5891.92 | 386 | 324 | 100.08 | 11 |
| 5880.66 | 420 | 338 | 100.08 | 12 |
| | | | | |

بازتاب شده از انتهای نمونه و طول نهایی نمونه در حضور گرادیان درجه حرارت هستند. طول L_f از رابطه (2) محاسبه می شود [7].

$$L_{f} = L_{0} \left(\mathbf{1} + \alpha (T_{1} - T_{0}) \right) \left(\mathbf{1} + \frac{\alpha}{2} (T_{2} - T_{1}) \right)$$
(2)
c, (1) c, (2) c,

$$C_m = \frac{2L_0}{t} (1 + \alpha (T_1 - T_0)) (1 + \frac{\alpha}{2} (T_2 - T_1))$$
(3)

2-3- ایجاد مدل خطا

مدل خطا عبارتی است که براساس رابطه اصلی اندازه گیری و منابع خطا تعیین میشود. برای تعیین مدل خطا باید از رابطه (3) نسبت به پارامترهای منابع خطا مشتق گرفته و آنها را با هم جمع کرد. مدل خطا در اندازه گیری سرعت امواج فراصوتی حجمی طولی در حضور گرادیان درجه حرارت به روش بازتابی به صورت روابط (5,4) است [8]:

$$C_{m} = f(L_{0,t}, T_{1,t}, T_{2})$$

$$\varepsilon_{C_{m}} = \frac{\partial C_{m}}{\partial L_{0}} \varepsilon_{L_{0}} + \frac{\partial C_{m}}{\partial t} \varepsilon_{t} + \frac{\partial C_{m}}{\partial T_{1}} \varepsilon_{T_{1}} + \frac{\partial C_{m}}{\partial T_{2}} \varepsilon_{T_{2}} =$$

$$(4)$$

$$a_{L_0}\varepsilon_{L_0} + a_t\varepsilon_t + a_{T_1}\varepsilon_{T_1} + a_{T_2}\varepsilon_{T_2}$$
(5)

در رابطه (5)، a ضریب حساسیت منبع خطای i است. در روابط (5,4) به دلیل ثابت بودن T_0 و α ، خطای ناشی از آنها صفر است؛ بنابراین خطاهای اندازه گیری T_0 t T_0 و T_1 منجربه ایجاد خطا در اندازه گیری C_m میشوند.

3-3- ايجاد مدل عدمقطعيت

عدمقطعیت در اندازه گیری سرعت
$$C_m$$
 برابر با رابطه (6) است [9].
 $u_{C_m} = t_{\nu,95} \left[\left(a_{L_0} u_{L_0} \right)^2 + \left(a_t u_t \right)^2 + \left(a_{T_1} u_{T_1} \right)^2 + \left(a_{T_2} u_{T_2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$ (%95)
(6)

i در رابطه (6)، u_i u_i و $t_{v,g5}$ به ترتیب عدمقطعیت منبع خطای i، ضریب حساسیت منبع خطای i و ضریب توزیع آماری است. v درجه آزادی است و با توجه به تعداد تکرارهای اندازه گیری تعیین می شود [9]. ضرایب همبستگی خطاها به دلیل مستقل بودن اندازه گیری متغیرها، صفر است.

3-4- تعیین خطاهای فرایند اندازه گیری

خطاهای فرایند اندازه گیری مؤلفههای تحلیل عدمقطعیت است. شناسایی منابع خطا جز جداییناپذیر در تعیین عدمقطعیت یک اندازه گیری است. خطاها در اندازه گیری سرعت امواج فراصوتی طولی در حضور گرادیان درجه حرارت به صورت روابط (7-10) است [8].

$$\begin{aligned} \varepsilon_{L_0} &= \varepsilon_{L_0,\text{ran}} + \varepsilon_{L_0,\text{sys}} & (7) \\ \varepsilon_t &= \varepsilon_{t,\text{ran}} + \varepsilon_{t,\text{sys}} & (8) \\ \varepsilon_{T_1} &= \varepsilon_{T_1,\text{ran}} + \varepsilon_{T_1,\text{sys}} & (9) \\ \varepsilon_T &= \varepsilon_{T_1,\text{ran}} + \varepsilon_{T_1,\text{sys}} & (10) \end{aligned}$$

در روابط (7-10) زیرنویس sys بیانگر خطای سیستماتیک و زیرنویس ran بیانگر خطای تصادفی است. در جدول 2 دقت اندازه گیری ابزارهای اندازه گیری آمده است.

جدول 2 دقت اندازهگیری ابزارهای اندازهگیری

| Table 2 Precision of measurement instruments | | | | | |
|---|---|------------------------------------|-----------|--|--|
| خطای سیستماتیک اندازہ - گیری زمان (µs) | خطای سیستماتیک ترموکوپلهای نوع- K (K) | خطای سیستماتیک کولیس (mm) | متغير | | |
| 0.01 | 2.2 | 0.01 | مقدار خطا | | |

جدول 3 مقادیر اندازه گیریشده از طول اولیه نمونهها

| Table 3 Measured values of the initial length of work pieces | | | | | | |
|--|---------------|---------------|-------|--|--|--|
| طول نمونه سوم | طول نمونه دوم | طول نمونه اول | شماره | | | |
| (mm) | (mm) | (mm) | تكرار | | | |
| 100.08 | 74.73 | 50.22 | 1 | | | |
| 100.08 | 74.68 | 50.23 | 2 | | | |
| 100.09 | 74.70 | 50.23 | 3 | | | |
| 100.09 | 74.68 | 50.22 | 4 | | | |
| 100.11 | 74.75 | 50.23 | 5 | | | |
| 100.07 | 74.67 | 50.23 | 6 | | | |
| 100.08 | 74.72 | 50.22 | 7 | | | |
| 100.11 | 74.68 | 50.24 | 8 | | | |
| 100.07 | 74.68 | 50.22 | 9 | | | |
| 100.06 | 74.69 | 50.24 | 10 | | | |

3-5- تخمين عدمقطعيتهاي فرايند اندازه گيري

عدمقطعیتهای اندازه گیری نیز مانند خطاهای اندازه گیری به دو قسمت سیستماتیک و تصادفی تقسیم می شوند. عدم قطعیتهای تصادفی به وسیله روش های آماری محاسبه می شوند. خطاهای سیستماتیک توسط سازنده دستگاههای اندازه گیری تعیین می شوند. عدم قطعیت سیستماتیک با احتمال 95% برابر نصف خطای سیستماتیک در نظر گرفته می شود [9]. عدم قطعیت سیستماتیک وسایل اندازه گیری در جدول 6 ارائه شده است.

به دلیل کمتر بودن تعداد تکرارها از 30 تکرار، برای محاسبههای آماری از آمار اندازه- محدود و توزیع استیودنتس-تی استفاده میشود [9]؛ بنابراین عدمقطعیتهای تصادفی با احتمال 95% توسط روابط (11-14) محاسبه

| | | مىسوىت. |
|---|--------------|---------|
| $u_{L_0,\mathrm{ran}} = S_{\overline{L_0}}$ | (%95) | (11) |
| $u_{t,\mathrm{ran}} = S_{\bar{t}}$ | (%95) | (12) |
| $u_{T_1,\mathrm{ran}} = S_{\overline{T_1}}$ | (%95) | (13) |

جدول 4 تکرارهای اندازه گیری t

Nie Ale

| $u_{T_2,\mathrm{ran}} = S_{\overline{T_2}}$ | (%95) | (14) |
|---|---|----------|
| منبع خطای <i>i</i> است و از | (14-11)، <i>S_ī</i> انحراف معيار مقادير | در روابط |

کرار اندازه گیری برای هر یک از
$$N$$
 تکرار اندازه گیری برای هر یک از S_i (15) در رابطه (15)، S_i

منابع خطاست. عدمقطعیت تصادفی منابع خطا در جدول 7 داده شده است.

6-3- محاسبه عدمقطعيت اجزا

برای محاسبه عدمقطعیت یک منبع خطا از جذر مجموع مجذور عدمقط عیتهای سیستماتیک و تصادفی آن منبع خطا به صورت روابط (16-11) استفاده می شود [9].

$$u_{L_0} = \sqrt{u_{L_0, \text{sys}}^2 + u_{L_0, \text{ran}}^2}$$
(16)

$$u_t = \sqrt{u_{t,\text{sys}}^2 + u_{t,\text{ran}}^2} \tag{17}$$

$$u_{T_1} = \sqrt{u_{T_1,\text{sys}}^2 + u_{T_1,\text{ran}}^2}$$
(18)

$$u_{T_2} = \sqrt{u_{T_2,\text{rys}}^2 + u_{T_2,\text{ran}}^2}$$
(19)

$$a_{L_0} = \left(\frac{\partial L_0}{\partial L_0} \right)_{(L_0, t, T_1, T_2) = (\overline{L_0}, \overline{t}, \overline{T_1}, \overline{T_2})}$$
(20)

$$a_t = \left(\underbrace{-m}_{\partial t} \right)_{(L_0, t, T_1, T_2) = (\overline{L_0, t}, \overline{T_1, T_2})}$$
(21)

$$a_{T_1} = \left(\frac{\partial C_m}{\partial T_1}\right)_{(L_0, t, T_1, T_2) = \left(\overline{L_0}, \overline{t}, \overline{T_1}, \overline{T_2}\right)}$$
(22)

$$a_{T_2} = \left(\frac{\partial C_m}{\partial T_2}\right)_{(L_0,t,T_1,T_2)=(\overline{L_0,t},\overline{T_1,T_2})}$$
(23)

عدمقطعیت منابع خطا و ضرایب حساسیت آنها در جدول 8 ارائه شده است. درجه آزادی 10 تکرار اندازهگیری متغیرها برابر 9 و درنتیجه مقدار ضریب توزیع 1₉₉₅ برابر 2.262 است [9].

3-7- تركيب اجزا عدمقطعيت

عدمقطعیتهای منابع خطا و ضرایب حساسیت آنها در رابطه (6) جایگزین میشوند و عدمقطعیت اندازه گیری سرعت امواج فراصوتی طولی در حضور

Table 4 Replications of measuring t

| | $t(\mu s)$ | | | | | | | شماره | | |
|----------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| تكرار 10 | تكرار 9 | تكرار 8 | تكرار 7 | تكرار 6 | تكرار 5 | تكرار 4 | تكرار 3 | تكرار 2 | تكرار 1 | آزمايش |
| 17.00 | 17.00 | 17.00 | 17.00 | 17.00 | 17.00 | 17.00 | 17.00 | 17.00 | 17.01 | 1 |
| 17.04 | 17.04 | 17.04 | 17.05 | 17.04 | 17.05 | 17.04 | 17.04 | 17.04 | 17.05 | 2 |
| 17.09 | 17.09 | 17.09 | 17.09 | 17.08 | 17.08 | 17.08 | 17.09 | 17.09 | 17.09 | 3 |
| 17.16 | 17.15 | 17.15 | 17.15 | 17.15 | 17.14 | 17.14 | 17.15 | 17.14 | 17.14 | 4 |
| 25.33 | 25.32 | 25.33 | 25.33 | 25.33 | 25.33 | 25.33 | 25.33 | 25.33 | 25.33 | 5 |
| 25.39 | 25.39 | 25.39 | 25.38 | 25.39 | 25.39 | 25.39 | 25.39 | 25.39 | 25.38 | 6 |
| 25.45 | 25.45 | 25.45 | 25.45 | 25.45 | 25.45 | 25.45 | 25.45 | 25.45 | 25.46 | 7 |
| 25.52 | 25.52 | 25.52 | 25.52 | 25.52 | 25.52 | 25.52 | 25.52 | 25.52 | 25.52 | 8 |
| 33.94 | 33.94 | 33.93 | 33.93 | 33.94 | 33.93 | 33.93 | 33.94 | 33.94 | 33.94 | 9 |
| 34.03 | 34.02 | 34.02 | 34.03 | 34.02 | 34.00 | 34.02 | 34.02 | 34.01 | 34.02 | 10 |
| 34.11 | 34.10 | 34.10 | 34.11 | 34.11 | 34.11 | 34.10 | 34.10 | 34.10 | 34.10 | 11 |
| 34.21 | 34.20 | 34.20 | 34.20 | 34.21 | 34.20 | 34.20 | 34.20 | 34.20 | 34.20 | 12 |

Table 5

| ت C_m | ندازه گیری و سرعه | ن متغیرهای ا | ادیر میانگی | دول 5 مق | ج |
|-----------------|-------------------|--------------|-------------|----------|---|
| The mean values | of measured va | riables and | velocity | C_m | |

 C_m مقادیر C_m تئوری و تجربی و عدمقطعیت اندازه گیری **C**_m مقادیر **P Table 9** Experimental and theoretical values of C_m and uncertainty of C_m and uncertainty of

| C_m | | | | | |
|----------|-----------|-----------------------------|----------------------------|--------|------------------|
| درصد خطا | u_{c_m} | $C_{m-\text{Experimental}}$ | $C_{m-\text{Theoretical}}$ | شماره | $\overline{C_m}$ |
| | (m/s) | (11/8) | (11/8) | ازمایش | 59 |
| 0.002 | 4.3 | 5910.75 | 5910.89 | 1 | 589 |
| 0.038 | 4.4 | 5898.38 | 5900.59 | 2 | 588 |
| 0.121 | 4.4 | 5882.69 | 5889.81 | 3 | 58 |
| 0.238 | 4.5 | 5863.84 | 5877.84 | 4 | 589 |
| 0.186 | 3.2 | 5899.72 | 5910.42 | 5 | 58 |
| 0.216 | 3.2 | 5887.36 | 5900.12 | 6 | 58 |
| 0.266 | 3.2 | 5875.05 | 5890.74 | 7 | 58 |
| 0.372 | 3.1 | 5859.72 | 5881.58 | 8 | 58 |
| 0.219 | 2.4 | 5898.64 | 5911.59 | 9 | 58 |
| 0.258 | 2.5 | 5886.54 | 5901.76 | 10 | 58 |
| 0.306 | 2.3 | 5873.90 | 5891.92 | 11 | 58 |
| 0.377 | 2.2 | 5858.48 | 5880.66 | 12 | |

 C_m مشابه مانند آزمایشهای 1, 5, 9 میتوان نتیجه گرفت که سرعت C_m مستقل از طول نخستین قطعه است. همچنین با افزایش دمای دو سطح بالایی و پایینی قطعه سرعت C_m کاهش میابد.

4- نتیجهگیری

در این مقاله برای نخستین بار اثر یک گرادیان درجه حرارت بر سرعت امواج فراصوتی در حضور توزیع دمای خطی بهصورت تجربی بررسی شد. برای این منظور دستگاهی ساخته شد تا شرایط دمایی و گرادیان درجه حرارت را در قطعه ایجاد کند. براساس جدولهای ارائهشده نتایج زیر بهدست میآید.

- به دلیل ضرورت ایجاد تعادل حرارتی و ارسال امواج فراصوتی حجمی طولی بهصورت همزمان، سوراخی در وسط بوش آلومینیم ایجاد شد تا امواج از طریق یک کفشک به قطعه ارسال و دریافت شوند. این سوراخ موجب انحراف کم توزیع دما از حالت خطی می شود. در واقع دما در وسط قطعه بیشتر از دما در نقاط جانبی قطعه است. این موضوع موجب ایجاد خطا بین مقادیر تئوری و تجربی می شود.

با افزایش دما در یک طول نخستین ثابت اختلاف مقادیر تئوری و
 تجربی افزایش مییابد. این روند به دلیل افزایش نشت حرارتی از وجه
 جانبی قطعههاست. عایقها به صورت کامل مانع از انتقال حرارت
 نمی شوند.

 افزایش طول اولیه قطعه موجب افزایش سطح جانبی قطعه میشود و در نتیجه سطح دارای نشت حرارتی افزایش مییابد، بنابراین اختلاف میان مقادیر تئوری و تجربی افزایش مییابد.

 – عدمقطعیت اندازه گیری سرعت امواج فراصوتی حجمی طولی در حضور گرادیان درجه حرارت برابر M/s بهدست آمد. کوچک بودن مقدار عدمقطعیت نشاندهنده دقت بالا و تکرارپذیری خوب اندازه گیریهاست.
 – میزان خطای اندازه گیری نسبت به مقادیر تئوری کمتر از 0.4% است که بیانگر دقت خوب دستگاه اندازه گیری است.

با افزایش دمای دو سطح بالایی و پایینی قطعه سرعت C_m کاهش
 می یابد.

از مقایسه نتایج آزمایشهای دارای شرایط تقریبا مشابه و با توجه به مقادیر عدم C_m مستقل از طول اولیه قطعه است.

5- مراجع

| $\overline{C_{m}}$ (m/s) | Ŧ (us) | \overline{T}_{2} (K) | \overline{T}_{1} (K) | $\overline{L_{0}}$ (mm) | شماره |
|--------------------------|--------|---------------------------|------------------------|-------------------------|--------|
| 0 _m (11/3) | t (µ3) | s) 12 (11) 11 (11) 20 (11 | | 20 () | آزمایش |
| 5910.75 | 17.00 | 322 | 307 | 50.23 | 1 |
| 5898.38 | 17.04 | 353 | 320 | 50.23 | 2 |
| 5882.69 | 17.09 | 385 | 334 | 50.23 | 3 |
| 5863.84 | 17.15 | 420 | 350 | 50.23 | 4 |
| 5899.72 | 25.33 | 323 | 308 | 74.70 | 5 |
| 5887.36 | 25.39 | 356 | 319 | 74.70 | 6 |
| 5875.05 | 25.45 | 390 | 325 | 74.70 | 7 |
| 5859.72 | 25.52 | 423 | 343 | 74.70 | 8 |
| 5898.64 | 33.94 | 322 | 304 | 100.08 | 9 |
| 5886.54 | 34.02 | 354 | 314 | 100.08 | 10 |
| 5873.90 | 34.10 | 386 | 324 | 100.08 | 11 |
| 5858.48 | 34.20 | 420 | 338 | 100.08 | 12 |

جدول 6 عدمقط**ع**یت سیستماتیک وسایل اندازه گیری

| Table 6 Systematic uncertainty of measurement instruments | | | | | |
|---|-------------|---------------|----------------|--|--|
| $u_{T_1,\text{sys}} = u_{T_2,\text{sys}}$ | $u_{t,sys}$ | $u_{L_0,sys}$ | | | |
| (K) | (µs) | (mm) | نوع عدمفطعيت | | |
| 1.1 | 0.005 | 0.005 | مقدار عدمقطعيت | | |

جدول 7 عدمقطعیت تصادفی منابع خطا

| $u_{T_2,ran}$ | u _{T11} ran (K) | $u_{t,ran}$ | $u_{L_0,ran}$ | شماره |
|---------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|--------|
| (K) | | (µs) | (mm) | آزمايش |
| 1 | 1 | 1.18×10 ⁻³ | 2.58×10 ⁻³ | 1 |
| 1 | 1 | 1.83×10 ⁻³ | 2.58×10 ⁻³ | 2 |
| 1 | 1 | 1.83×10 ⁻³ | 2.58×10 ⁻³ | 3 |
| 1 | 1 | 2.36×10 ⁻³ | 2.58×10 ⁻³ | 4 |
| 1 | 1 | 1.05×10-3 | 8.17×10 ⁻³ | 5 |
| 1 | 1 | 1.49×10 ⁻³ | 8.17×10 ⁻³ | 6 |
| 1 | 1 | 1.05×10-3 | 8.17×10 ⁻³ | 7 |
| 1 | 1 | 0 | 8.17×10 ⁻³ | 8 |
| 1 | 1 | 2.11×10 ⁻³ | 5.38×10 ⁻³ | 9 |
| 1 | 1 | 2.79×10 ⁻³ | 5.38×10 ⁻³ | 10 |
| 1 | 1 | 2.11×10 ⁻³ | 5.38×10 ⁻³ | 11 |
| 1 | 1 | 1.49×10 ⁻³ | 5.38×10 ⁻³ | 12 |

جدول 8 عدمقطعیت و ضرایب حساسیت منابع خطا

 Table 8 Uncertainty and sensitivity coefficients of errors' sources

| a_{T_1} | u_{T_1} | a_t | u_t | a_{L_0} | u_{L_0} | شماره |
|-------------|-----------------|---------------------|-------|---------------------|-----------|--------|
| $= a_{T_2}$ | $= u_{T_2}$ (K) | (×10 ⁸) | (ns) | (×10 ⁵) | (µm) | آزمايش |
| 0.034 | 1.49 | -3.48 | 5.14 | 1.18 | 5.63 | 1 |
| 0.034 | 1.49 | -3.46 | 5.32 | 1.17 | 5.63 | 2 |
| 0.034 | 1.49 | -3.44 | 5.32 | 1.17 | 5.63 | 3 |
| 0.034 | 1.49 | -3.42 | 5.53 | 1.17 | 5.63 | 4 |
| 0.034 | 1.49 | -2.33 | 5.11 | 0.79 | 9.58 | 5 |
| 0.034 | 1.49 | -2.32 | 5.22 | 0.79 | 9.58 | 6 |
| 0.034 | 1.49 | -2.31 | 5.11 | 0.79 | 9.58 | 7 |
| 0.034 | 1.49 | -2.30 | 5 | 0.78 | 9.58 | 8 |
| 0.034 | 1.49 | -1.74 | 5.43 | 0.59 | 7.34 | 9 |
| 0.034 | 1.49 | -1.73 | 5.73 | 0.59 | 7.34 | 10 |
| 0.034 | 1.49 | -1.72 | 5.43 | 0.59 | 7.34 | 11 |
| 0.034 | 1.49 | -1.71 | 5.22 | 0.58 | 7.34 | 12 |

گرادیان درجه حرارت بهدست میآید. جدول 9 شامل سرعت امواج فراصوتی طولی در حضور گرادیان درجه حرارت بهصورت تئوری و تجربی، عدمقطعیت آزمایشها و درصد خطا میان نتایج تئوری و تجربی است.

با توجه به جدول 9، تطابق بسیار خوبی میان نتایج تئوری و تجربی وجود دارد. مقدار پایین عدمقطعیتها نشاندهنده دقت و تکرارپذیری بالای روش اندازهگیری است. از مقایسه نتایج آزمایشهای دارای شرایط تقریبا

P. J. Shull, Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques and Application, pp. 61, New York: Marcel Dekker, Inc., 2002.

Vol. 14, No. 15, pp. 423-430, 2015. (in Persian فارسى)

- [6] P. B. Nagy, F. Simonetti, G. Instanes, Corrosion and erosion monitoring in plates and pipes using constant group velocity Lamb wave inspection, *Ultrasonics*, Vol. 54, No. 7, pp. 1832-1841, 2014.
- [7] R. Shabani, F. Honarvar, Variation of Longitudinal Ultrasonic Wave Velocity in the Presence of a Thermal Gradient; Part 1: 2D Theoretical and Numerical Models, Modares Mechanical Engineering, In This Issue. (in Persian فارسى)
- [8] B. O'Connor, Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods, pp. I-23, Washington DC: NASA, 2010.
 [9] R. S. Figliola, D. E. Beasley, *Theory and Design for Mechanical*
- Measurements, Fifth Edition, pp. 118-199, New York: Wiley, 2011.
- [2] R. Kazys, L. Mazeika, R. Sliteris, R. Raisutis, Measurement of viscosity of highly viscous non-Newtonian fluids by means of ultrasonic guided waves, Ultrasonics, Vol. 54, No. 4, pp. 1104-1112, 2014.
- [3] K. Burgess, V. Prakapenka, E. Hellebrand, P.V. Zinin, Elastic characterization [4] K. Dougos, V. Hakapenki, E. Honerature by combined laser heating and laser ultrasonic techniques, *Ultrasonics*, Vol. 54, No. 4, pp. 963-966, 2014.
 [4] K. Nowacki, W. Kasprzyk, The sound velocity in an alloy steel at high-temperature conditions, *Thermophysics*, Vol. 31, No. 1, pp. 103-112, 2010.
 [5] A. Taheri, F. Honarvar, Multiple Scattering of an Acoustic Wave from Fibers
- Encased in a Solid Viscoelastic Medium, Modares Mechanical Engineering,