



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

رامین شعبانی¹، فرهنگ هنرور^{2*}

1 - کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

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

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 05 بهمن 1394

پذیرش: 09 اسفند 1394

ارائه در سایت: 07 فروردین 1395

کلید واژگان:

امواج فراصوتی حجمی طولی

گرادیان درجه حرارت

روش تجربی

تحلیل عدم قطعیت

چکیده

بازرسی قطعات در صنایع مختلف امری ضروری است. روش‌های گوناگونی بدین منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از پرکاربردترین این روش‌ها آزمون فراصوتی است. آزمون فراصوتی کاربردهای متعددی مانند شناسایی و ارزیابی عیوب، اندازه‌گیری برخی خواص مکانیکی و متالورژیکی مواد و دماسنجی دارد. در بخش نخست این مقاله، معادلات تئوری و تحلیل اجزا محدود چگونگی تغییر سرعت امواج فراصوتی در حضور گرادیان درجه حرارت ارائه شد. در این بخش به بررسی اثر گرادیان درجه حرارت بر سرعت امواج فراصوتی طولی به صورت تجربی پرداخته می‌شود. برای انجام آزمایش‌های تجربی دستگاهی خاص طراحی و ساخته شده است. این دستگاه شرایط توزیع دمای مناسب و شرایط ارسال و دریافت امواج فراصوتی حجمی طولی را به صورت 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 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 آزمایش‌های انجام‌شده، عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت صوت 4.5 m/s بوده است.

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

Original Research Paper

Received 25 January 2016

Accepted 28 February 2016

Available Online 26 March 2016

Keywords:

Longitudinal Ultrasonic Bulk Waves

Thermal Gradient

Experimental Method

Uncertainty Analysis

ABSTRACT

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 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

ویسکوزیته سیالات غیرنیوتونی به وسیله امواج فراصوتی هدایت شده ارائه کردند. بورگس و همکارانش [3] روش جدید پمپ- کاوند¹ ترکیب‌شده با حرارت‌دهی لیزری را برای اندازه‌گیری 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 می‌توانند در مواد جامد، مایع و هوا انتشار یابند. این امواج دارای کاربردهای متعددی مانند ضخامت‌سنجی، عیب‌یابی و تعیین برخی خواص الاستیک هستند [1]. کازپاس و همکارانش [2] روش جدیدی برای اندازه‌گیری

¹ Pump-probe

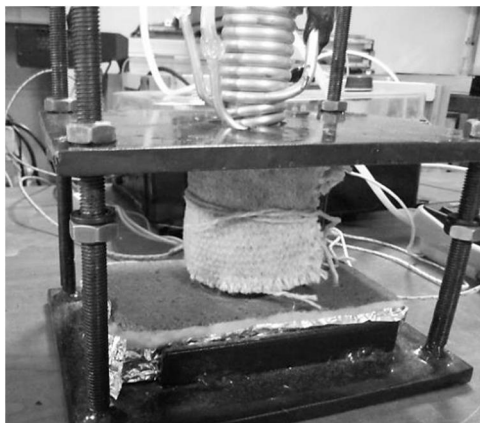


Fig. 1 Fixture to adjust position and height of cooling system

شکل 1 قید و بند طراحی و ساخته شده برای تنظیم موقعیت و تنظیم ارتفاع سیستم سرمایش

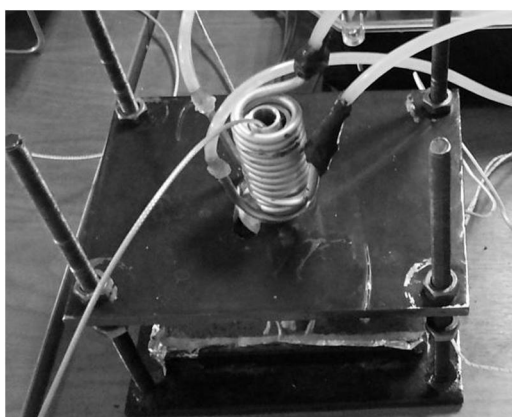


Fig. 2 Cooling system

شکل 2 سیستم سرمایش

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

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

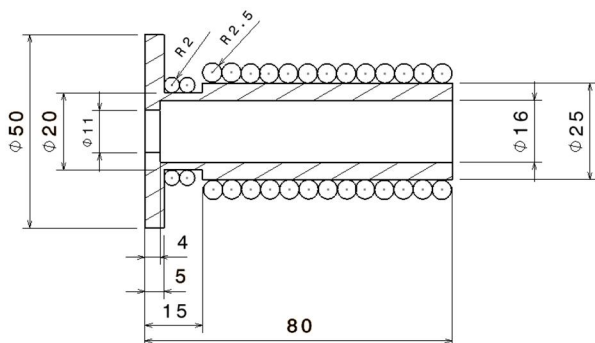


Fig. 3 Aluminum bushing and aluminum pipes (dimensions are in mm)

شکل 3 ابعاد بوش و لوله‌های آلومینیم (ابعاد به mm)

ابعاد میکرون است. با اندازه‌گیری 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 در نظر گرفتن اثرات میرایی در ماده زمینه و در نظر گرفتن استوانه‌ها به‌صورت همسان‌گرد و همسان‌گرد عرضی ارائه کردند. آن‌ها نتایج تئوری به‌دست‌آمده را با نتایج تجربی مقایسه کردند. یکی از کاربردهای مهم اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی در ضخامت‌سنجی و در نتیجه تعیین خوردگی در لوله‌هاست [6]. در اغلب موارد دمای قطعه برای ضخامت‌سنجی ثابت فرض می‌شود. این موضوع در برخی موارد سبب ایجاد خطا در اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری منابع خطا شناسایی شدند و عدم قطعیت اندازه‌گیری به‌صورت استاندارد تعیین شد.

2- طراحی 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.

2-1- سیستم سرمایش

در طراحی سیستم سرمایش ملاک‌های متعددی در نظر 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

دیسک وصل است. دمای دیسک از طریق ترموکوپل به کنترل‌کننده دما منتقل می‌شود. مدار کنترل‌کننده دما در شکل 5 نشان داده شده است.

حرارت‌دهنده‌ها نیز به کنترل‌کننده دما متصل می‌شوند. قسمت تولید حرارت در درون دیسک قرار داده می‌شود. حرارت‌دهنده‌ها دارای توان 100W است. گرمای تولید شده از طریق حرارت‌دهنده‌ها به دیسک انتقال می‌یابد. شکل 6 وضعیت قرار گرفتن بوش آلومینیم، قطعه، تراگذار و دیسک 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 می‌رسد. از دو ترموکوپل نوع K نیز برای اندازه‌گیری دماهای دو سطح بالایی و پایینی قطعه در حالت تعادل استفاده می‌شود. نمای کلی دستگاه ساخته شده در شکل 7 نشان داده شده است.

2-3- اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی

پس از ایجاد تعادل حرارتی مورد نظر در قطعه، تراگذار در محل مناسب قرار داده می‌شود و امواج به درون قطعه ارسال و سپس دریافت می‌شوند. 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 طول‌های مختلف ساخته شد. در 12 حالت مختلف آزمایش انجام

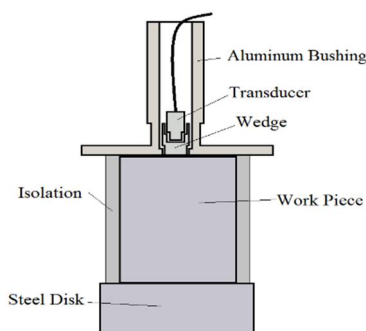


Fig. 6 Schematic of the test setup

شکل 6 شماتیک دستگاه اندازه‌گیری



Fig. 7 The test setup

شکل 7 دستگاه اندازه‌گیری

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 10 MHz تولید می‌کند. تراگذار مورد استفاده در دمای بالاتر از 333K خاصیت خود را از دست می‌دهد؛ بنابراین به یک کفشک¹ برای جلوگیری از انتقال حرارت قطعه به تراگذار نیاز است. برای این منظور کفشکی از جنس پلکسی‌گلاس متناسب با ابعاد تراگذار و بوش ساخته شده است. این کفشک قابلیت انتقال امواج فراصوتی را دارد و همچنین به‌عنوان عایق حرارت مانع از انتقال حرارت به تراگذار می‌شود. شکل 4 کفشک ساخته شده را نشان می‌دهد.

سیستم سرمایش به نحوی طراحی شد تا علاوه بر خنک‌کردن قطعه موجب خنک‌کردن 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 کنترل‌کننده دما و یک ترموکوپل نوع K تشکیل شده است. کنترل‌کننده دما می‌تواند دمای دیسک را در دمای مورد نظر به‌صورت ثابت نگه دارد. ترموکوپل به این کنترل‌کننده متصل شده و قسمت حسگر آن به



Fig. 4 Wedge made for the transmission of ultrasonic waves

شکل 4 کفشک ساخته شده برای انتقال امواج فراصوتی

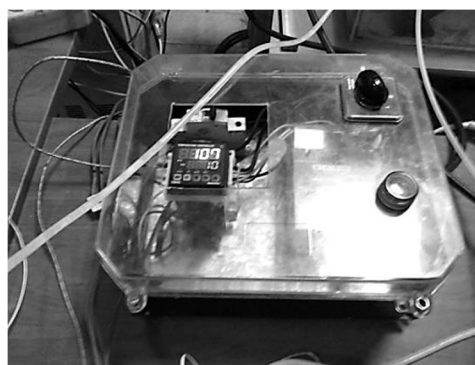


Fig. 5 Temperature control circuit

شکل 5 مدار کنترل‌کننده دما

¹ Wedge
² Heater

بازتاب‌شده از انتهای نمونه و طول نهایی نمونه در حضور گرادیان درجه حرارت هستند. طول L_f از رابطه (2) محاسبه می‌شود [7].

$$L_f = L_0(1 + \alpha(T_1 - T_0))(1 + \frac{\alpha}{2}(T_2 - T_1)) \quad (2)$$

در رابطه (2)، α ضریب انبساط حرارتی ماده است. با توجه به روابط (2,1)، سرعت امواج فراصوتی طولی در حضور گرادیان درجه حرارت به روش بازتابی از رابطه (3) قابل محاسبه است.

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

3-2- ایجاد مدل خطا

مدل خطا عبارتی است که براساس رابطه اصلی اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی حجمی طولی در حضور گرادیان درجه حرارت به روش بازتابی به صورت روابط (5,4) است [8]:

$$C_m = f(L_0, t, T_1, T_2) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{C_m} = \frac{\partial C_m}{\partial L_0} \varepsilon_{L_0} + \frac{\partial C_m}{\partial t} \varepsilon_t + \frac{\partial C_m}{\partial T_1} \varepsilon_{T_1} + \frac{\partial C_m}{\partial T_2} \varepsilon_{T_2} =$$

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

در رابطه (5)، a_i 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 اندازه‌گیری L_0 ، t ، T_1 و T_2 منجر به ایجاد خطا در اندازه‌گیری C_m می‌شوند.

3-3- ایجاد مدل عدم قطعیت

عدم قطعیت در اندازه‌گیری سرعت C_m برابر با رابطه (6) است [9].

$$u_{C_m} = t_{v,95} [(a_{L_0} u_{L_0})^2 + (a_t u_t)^2 + (a_{T_1} u_{T_1})^2 + (a_{T_2} u_{T_2})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (\%95) \quad (6)$$

در رابطه (6)، a_i ، u_i و $t_{v,95}$ به ترتیب عدم قطعیت منبع خطای i ، ضریب حساسیت منبع خطای i و ضریب توزیع آماری است. v درجه آزادی است و با توجه به تعداد تکرارهای اندازه‌گیری تعیین می‌شود [9]. ضرایب همبستگی خطاها به دلیل مستقل بودن اندازه‌گیری متغیرها، صفر است.

3-4- تعیین خطاهای فرایند اندازه‌گیری

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

$$\varepsilon_{L_0} = \varepsilon_{L_0,ran} + \varepsilon_{L_0,sys} \quad (7)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{t,ran} + \varepsilon_{t,sys} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{T_1} = \varepsilon_{T_1,ran} + \varepsilon_{T_1,sys} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{T_2} = \varepsilon_{T_2,ran} + \varepsilon_{T_2,sys} \quad (10)$$

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

تکرار اندازه‌گیری طول نمونه‌ها نیز در جدول 3 ارائه شده است. هر یک از اندازه‌گیری‌ها 10 بار تکرار می‌شوند تا قابلیت تکرارپذیری بررسی شود.

مقادیر تکرار اندازه‌گیری t در جدول 4 ارائه شده است. جدول 5 شامل مقادیر میانگین متغیرهای اندازه‌گیری و میانگین سرعت C_m است.

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

3- عدم قطعیت در اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی در حضور

گرادیان درجه حرارت

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

- تعریف رابطه
- ایجاد مدل خطا
- ایجاد مدل عدم قطعیت
- تعیین خطاهای فرایند اندازه‌گیری
- تخمین عدم قطعیت‌های فرایند اندازه‌گیری
- محاسبه عدم قطعیت اجزا
- ترکیب اجزا عدم قطعیت

3-1- تعریف رابطه

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

$$C_m = \frac{2L_f}{t} \quad (1)$$

در رابطه (1)، t و L_f به ترتیب اختلاف زمانی بین دو سیگنال متوالی

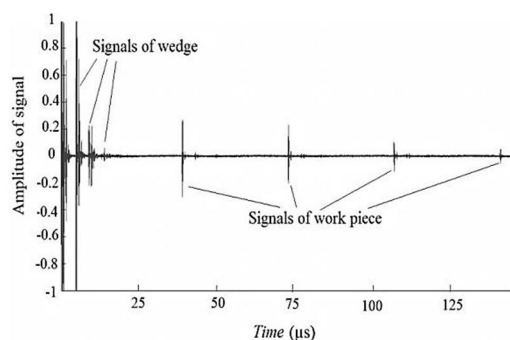


Fig. 8 Recorded signals in the presence of a thermal gradient

شکل 8 سیگنال‌های ثبت‌شده در حضور گرادیان درجه حرارت

جدول 1 حالت‌های مختلف در اندازه‌گیری سرعت C_m به صورت تجربی

Table 1 different condition in which velocity measurement were carried out

شماره آزمایش	طول اولیه نمونه L_0 (mm)	دمای کمینه T_1 (K)	دمای بیشینه T_2 (K)	سرعت C_m تئوری (m/s)
1	50.23	307	322	5910.89
2	50.23	320	353	5900.59
3	50.23	334	385	5889.81
4	50.23	350	420	5877.84
5	74.70	308	323	5910.42
6	74.70	319	356	5900.12
7	74.70	325	390	5890.74
8	74.70	343	423	5881.58
9	100.08	304	322	5911.59
10	100.08	314	354	5901.76
11	100.08	324	386	5891.92
12	100.08	338	420	5880.66

جدول 2 دقت اندازه‌گیری ابزارهای اندازه‌گیری

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

$$u_{T_2, \text{ran}} = S_{\bar{T}_2} \quad (95\%) \quad (14)$$

در روابط (14-11)، $S_{\bar{T}_i}$ انحراف معیار مقادیر منبع خطای i است و از رابطه (15) محاسبه می‌شود [9].

$$S_{\bar{T}_i} = \frac{S_i}{\sqrt{N}} \quad (15)$$

در رابطه (15)، S_i انحراف معیار N تکرار اندازه‌گیری برای هر یک از منابع خطاست. عدم قطعیت تصادفی منابع خطا در جدول 7 داده شده است.

3-6- محاسبه عدم قطعیت اجزا

برای محاسبه عدم قطعیت یک منبع خطا از جذر مجموع مجذور عدم قطعیت‌های سیستماتیک و تصادفی آن منبع خطا به صورت روابط (16-19) استفاده می‌شود [9].

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

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

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

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

ضرایب حساسیت برای منابع خطا براساس رابطه (5) محاسبه می‌شوند.

$$a_{L_0} = \left(\frac{\partial C_m}{\partial L_0} \right)_{(L_0, t, T_1, T_2) = (\bar{L}_0, \bar{t}, \bar{T}_1, \bar{T}_2)} \quad (20)$$

$$a_t = \left(\frac{\partial C_m}{\partial t} \right)_{(L_0, t, T_1, T_2) = (\bar{L}_0, \bar{t}, \bar{T}_1, \bar{T}_2)} \quad (21)$$

$$a_{T_1} = \left(\frac{\partial C_m}{\partial T_1} \right)_{(L_0, t, T_1, T_2) = (\bar{L}_0, \bar{t}, \bar{T}_1, \bar{T}_2)} \quad (22)$$

$$a_{T_2} = \left(\frac{\partial C_m}{\partial T_2} \right)_{(L_0, t, T_1, T_2) = (\bar{L}_0, \bar{t}, \bar{T}_1, \bar{T}_2)} \quad (23)$$

عدم قطعیت منابع خطا و ضرایب حساسیت آن‌ها در جدول 8 ارائه شده است. درجه آزادی 10 تکرار اندازه‌گیری متغیرها برابر 9 و در نتیجه مقدار ضریب توزیع $t_{9,95}$ برابر 2.262 است [9].

3-7- ترکیب اجزا عدم قطعیت

عدم قطعیت‌های منابع خطا و ضرایب حساسیت آن‌ها در رابطه (6) جایگزین می‌شوند و عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی طولی در حضور

جدول 3 مقادیر اندازه‌گیری شده از طول اولیه نمونه‌ها
Table 3 Measured values of the initial length of work pieces

شماره تکرار	طول نمونه اول (mm)	طول نمونه دوم (mm)	طول نمونه سوم (mm)
1	50.22	74.73	100.08
2	50.23	74.68	100.08
3	50.23	74.70	100.09
4	50.22	74.68	100.09
5	50.23	74.75	100.11
6	50.23	74.67	100.07
7	50.22	74.72	100.08
8	50.24	74.68	100.11
9	50.22	74.68	100.07
10	50.24	74.69	100.06

3-5- تخمین عدم قطعیت‌های فرایند اندازه‌گیری

عدم قطعیت‌های اندازه‌گیری نیز مانند خطاهای اندازه‌گیری به دو قسمت سیستماتیک و تصادفی تقسیم می‌شوند. عدم قطعیت‌های تصادفی به وسیله روش‌های آماری محاسبه می‌شوند. خطاهای سیستماتیک توسط سازنده دستگاه‌های اندازه‌گیری تعیین می‌شوند. عدم قطعیت سیستماتیک با احتمال 95% برابر نصف خطای سیستماتیک در نظر گرفته می‌شود [9]. عدم قطعیت سیستماتیک وسایل اندازه‌گیری 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 عدم قطعیت‌های تصادفی با احتمال 95% توسط روابط (14-11) محاسبه می‌شوند.

$$u_{L_0, \text{ran}} = S_{\bar{L}_0} \quad (95\%) \quad (11)$$

$$u_{t, \text{ran}} = S_{\bar{t}} \quad (95\%) \quad (12)$$

$$u_{T_1, \text{ran}} = S_{\bar{T}_1} \quad (95\%) \quad (13)$$

جدول 4 تکرارهای اندازه‌گیری t

Table 4 Replications of measuring t										شماره آزمایش
t (μs)										
تکرار 10	تکرار 9	تکرار 8	تکرار 7	تکرار 6	تکرار 5	تکرار 4	تکرار 3	تکرار 2	تکرار 1	
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

جدول 9 مقادیر C_m تئوری و تجربی و عدم قطعیت اندازه‌گیری C_m Table 9 Experimental and theoretical values of C_m and uncertainty of C_m

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

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 می‌یابد.

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 می‌شود. در واقع دما در وسط قطعه بیشتر از دما در نقاط جانبی قطعه است. این موضوع موجب ایجاد خطا بین مقادیر تئوری و تجربی می‌شود.

– 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 به‌صورت کامل مانع از انتقال حرارت نمی‌شوند.

– 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.

– عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی حجمی طولی در حضور گرادیان درجه حرارت برابر 4.5 m/s به‌دست آمد. کوچک بودن مقدار عدم قطعیت نشان‌دهنده دقت بالا و تکرارپذیری خوب اندازه‌گیری‌هاست.

– میزان خطای اندازه‌گیری نسبت به مقادیر تئوری کمتر از 0.4% است که بیانگر دقت خوب دستگاه اندازه‌گیری است.

– با افزایش دمای دو سطح بالایی و پایینی قطعه سرعت C_m کاهش می‌یابد.

– از مقایسه نتایج آزمایش‌های دارای شرایط تقریباً مشابه و با توجه به مقادیر عدم قطعیت‌ها می‌توان نتیجه گرفت که سرعت C_m مستقل از طول اولیه قطعه است.

5- مراجع

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

جدول 5 مقادیر میانگین متغیرهای اندازه‌گیری و سرعت C_m Table 5 The mean values of measured variables and velocity C_m

شماره آزمایش	$\bar{L}_0$ (mm)	$\bar{T}_1$ (K)	$\bar{T}_2$ (K)	$\bar{t}$ (μ s)	$\bar{C}_m$ (m/s)
1	50.23	307	322	17.00	5910.75
2	50.23	320	353	17.04	5898.38
3	50.23	334	385	17.09	5882.69
4	50.23	350	420	17.15	5863.84
5	74.70	308	323	25.33	5899.72
6	74.70	319	356	25.39	5887.36
7	74.70	325	390	25.45	5875.05
8	74.70	343	423	25.52	5859.72
9	100.08	304	322	33.94	5898.64
10	100.08	314	354	34.02	5886.54
11	100.08	324	386	34.10	5873.90
12	100.08	338	420	34.20	5858.48

جدول 6 عدم قطعیت سیستماتیک وسایل اندازه‌گیری

Table 6 Systematic uncertainty of measurement instruments

نوع عدم قطعیت	$u_{L_0,sys}$ (mm)	$u_{t,sys}$ (μ s)	$u_{T_1,sys} = u_{T_2,sys}$ (K)
مقدار عدم قطعیت	0.005	0.005	1.1

جدول 7 عدم قطعیت تصادفی منابع خطا

Table 7 Random uncertainty of errors' sources

شماره آزمایش	$u_{L_0,ran}$ (mm)	$u_{t,ran}$ (μ s)	$u_{T_1,ran}$ (K)	$u_{T_2,ran}$ (K)
1	2.58×10^{-3}	1.18×10^{-3}	1	1
2	2.58×10^{-3}	1.83×10^{-3}	1	1
3	2.58×10^{-3}	1.83×10^{-3}	1	1
4	2.58×10^{-3}	2.36×10^{-3}	1	1
5	8.17×10^{-3}	1.05×10^{-3}	1	1
6	8.17×10^{-3}	1.49×10^{-3}	1	1
7	8.17×10^{-3}	1.05×10^{-3}	1	1
8	8.17×10^{-3}	0	1	1
9	5.38×10^{-3}	2.11×10^{-3}	1	1
10	5.38×10^{-3}	2.79×10^{-3}	1	1
11	5.38×10^{-3}	2.11×10^{-3}	1	1
12	5.38×10^{-3}	1.49×10^{-3}	1	1

جدول 8 عدم قطعیت و ضرایب حساسیت منابع خطا

Table 8 Uncertainty and sensitivity coefficients of errors' sources

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

گرادیان درجه حرارت به‌دست می‌آید. جدول 9 شامل سرعت امواج فراصوتی طولی در حضور گرادیان درجه حرارت به‌صورت تئوری و تجربی، عدم قطعیت 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 عدم قطعیت‌ها نشان‌دهنده دقت و تکرارپذیری بالای روش اندازه‌گیری است. از مقایسه نتایج آزمایش‌های دارای شرایط تقریباً

- Vol. 14, No. 15, pp. 423-430, 2015. (in Persian فارسی)
- [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 فارسی)
- [8] B. O'Connor, *Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods*, pp. 1-23, 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 of platinum/rhodium alloy at high temperature 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*,