



تغییرات سرعت امواج فراصوتی طولی در حضور یک گرادیان درجه حرارت؛ بخش اول: مدل های دو بعدی تئوری و عددی

رامین شعبانی¹، فرهنگ هنرور^{2*}

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
* تهران، صندوق پستی 19395-1999، honarvar@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 05 بهمن 1394
پذیرش: 01 اسفند 1394
ارائه در سایت: 24 اسفند 1394
کلید واژگان:

موج فراصوتی طولی
گرادیان حرارتی
روش تئوری
روش اجزا محدود

چکیده

آزمون فراصوتی یک روش غیر مخرب پرکاربرد برای تعیین خواص مکانیکی و متالورژیکی مواد است. در این روش، سرعت و یا ضریب استهلاک امواج فراصوتی اندازه گیری می شوند و دقت اندازه گیری آنها بسیار مهم است. در این مقاله، تغییرات سرعت امواج فراصوتی طولی حجمی در حضور یک گرادیان حرارتی و با فرض توزیع دمایی خطی به دو روش تئوری و عددی بر اساس یک مدل دو بعدی مورد بررسی قرار می گیرد. اثر گرادیان دما و دو پارامتر طول قطعه و دمایی سطح گرم قطعه به عنوان پارامترهای تعیین کننده اثر گرادیان درجه حرارت بر روی سرعت موج فراصوتی مورد مطالعه قرار می گیرد. جهت انجام مطالعات تئوری، معادله ای جدید برای اولین بار برای این مسئله ارائه می شود. جنس قطعه مورد مطالعه فولاد st37 است. جهت ارزیابی معادله ای بدست آمده ابتدا دماهای دو سطح بالایی و پایینی قطعه ثابت فرض می شود و اثر تغییرات طول قطعه در بازه 0.05-0.1 m بر روی سرعت امواج فراصوتی بررسی می شود. سپس اثر تغییرات دمایی قسمت گرم قطعه با فرض ثابت بودن طول قطعه و دمایی سطح بالایی، در محدوده دمایی 398-998 K بررسی می شود. مدل سازی عددی این مسئله در نرم افزار اجزای محدود انسیس انجام شده است. نتایج حاصل از مدل تئوری با نتایج حاصل از مدل عددی اجزا محدود مقایسه و تطابق بسیار خوبی بین آنها مشاهده شده است.

Variation of Longitudinal Ultrasonic Wave Velocity in the Presence of a Thermal Gradient; Part 1: 2D Theoretical and Numerical Models

Ramin Shabani, Farhang Honarvar*

Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 19395-1999, Tehran, Iran, honarvar@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 25 January 2016
Accepted 20 February 2016
Available Online 14 March 2016

Keywords:

Longitudinal ultrasonic wave
Thermal Gradient
Theoretical method
Finite element method

ABSTRACT

Ultrasound test is a widely used non-destructive method for determining the mechanical and metallurgical properties of materials. In this method, ultrasonic wave velocity or attenuation coefficient is measured and measurement accuracy is very important. In this paper, variations of longitudinal wave velocity are studied in the presence of a thermal gradient both theoretically and numerically using a 2D model. A linear temperature distribution is assumed and the length of the work piece and the temperature of the hot side are considered as varying parameters. A new 2D theoretical model is developed for this problem. The test piece is made of st37 steel. To evaluate the proposed equation, we assume constant temperatures and the length of the work piece are varied in the range of 0.05-0.1 m. Then, we study the effect of the temperature of the hot side from 398-998 K. By ANSYS software, a novel two-dimensional finite element model (FEM) is developed in axisymmetric state for this problem. The results of the theoretical model are compared with those obtained from the numerical model and very good agreement is observed.

1- مقدمه

بررسی تجربی آنها بیانگر کاهش سرعت امواج فراصوتی حجمی طولی و عرضی با افزایش دما است. پالاینیکی و همکارانش [2] از طریق اندازه گیری سرعت امواج فراصوتی، اندازه ی دانه بندی را در یک فولاد زنگ نزن آستنیتی تخمین زدند. اسزایو و وو [3] یک مدل ریاضی برای انتشار امواج فراصوتی طولی و عرضی در یک ماده ویسکوالاستیک ارائه کردند. نمازی و هنرور [4] از الگوریتم SAGE (که یک روش تخمین به کمک مدل سازی است) برای

امروزه روش های مختلفی برای بازرسی و ارزیابی غیرمخرب مواد و قطعات صنعتی وجود دارد. در میان این روش ها، روش فراصوتی کاربردهای متنوع و متعددی در بازرسی قطعات و تعیین خواص مکانیکی و متالورژیکی مواد دارند. راجندران و همکارانش [1] دستگاهی کم هزینه و جدید برای بررسی اثر دما بر سرعت امواج فراصوتی و استهلاک امواج فراصوتی ساختند. نتایج

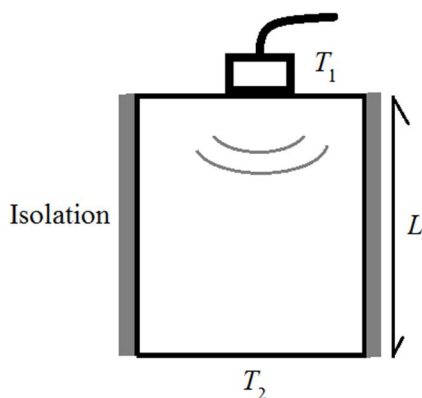


Fig. 1 Heat transfer method and transferring longitudinal ultrasonic bulk waves in the presence of a thermal gradient by pulse-echo method
 شکل 1 نحوه انتقال حرارت و ارسال امواج فراصوتی به روش بازتابی در حضور یک گرادیان درجه حرارت

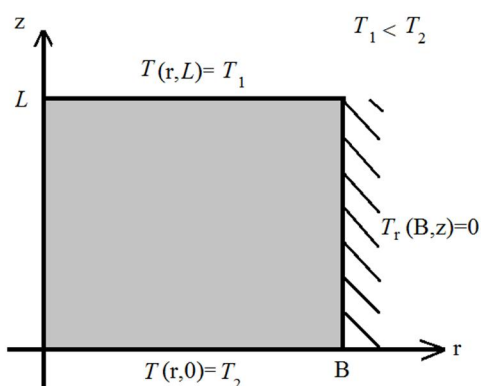


Fig. 2 Thermal boundary conditions of the problem in axisymmetric state

شکل 2 شرایط مرزی حرارتی مسئله در حالت تقارن محوری

از روش جداسازی متغیرها به صورت زیر برای بدست آوردن توزیع دما استفاده می‌شود:

$$T(r, z) = R(r)Z(z) \quad (5)$$

$$T_{rr}(r, z) = \frac{d^2 R}{dr^2} Z(z) \quad (6)$$

$$T_r(r, z) = \frac{dR}{dr} Z(z) \quad (7)$$

$$T_{zz}(r, z) = \frac{d^2 Z}{dz^2} R(r) \quad (8)$$

با توجه به شرایط مرزی روابط زیر برقرار است:

$$R(r)Z(L) = T_1 \Rightarrow R(r) = \text{ثابت} \quad (9)$$

$$R(r)Z(0) = T_2 \Rightarrow R(r) = \text{ثابت} \quad (10)$$

$$\frac{dR}{dr}(B) Z(z) = 0 \Rightarrow \frac{dR}{dr}(B) = 0 \quad (11)$$

بنابراین با توجه به معادلات فوق نتایج زیر بدست می‌آیند:

$$R(r) = K \quad (12)$$

$$T(r, z) = K Z(z) \quad (13)$$

در معادله فوق K مقداری ثابت و مخالف صفر است. با قرار دادن روابط

فوق در معادله 1 تابع $Z(z)$ بدست می‌آید.

$$K \frac{d^2 Z}{dz^2} = 0 \Rightarrow \frac{d^2 Z}{dz^2} = 0 \Rightarrow Z(z) = az + b \quad (14)$$

بنابراین توزیع دما به صورت خطی است:

افزایش دقت اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی استفاده کردند. آنها نشان دادند که این روش می‌تواند عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت فراصوت را به صورت قابل توجهی بهبود بخشد.

بازرسی فراصوتی در اغلب موارد توسط امواج حجمی صورت می‌گیرد. در بررسی تئوری یک موج فراصوتی حجمی بر خلاف موج فراصوتی یک بعدی، ضریب پواسون باید در نظر گرفته شود. همچنین جایابی ذرات در یک موج فراصوتی حجمی در جهات مختلف رخ می‌دهد [5]. بنابراین موج فراصوتی طولی در دو حالت حجمی و یک بعدی دارای تفاوت ساختاری است و اندازه‌ی سرعت موج در این دو حالت متفاوت است.

در این مقاله، اثر گرادیان درجه حرارت بر سرعت امواج فراصوتی حجمی طولی در یک قطعه استوانه‌ای از جنس فولاد st37 بررسی شده است. برای انجام بررسی‌های تئوری معادله‌ای جدید ارائه شده است. دو متغیر مهم در معادله ارائه شده، طول اولیه نمونه و دمای سطح پایینی هستند و اثر این دو متغیر بر سرعت امواج فراصوتی مطالعه می‌شود. همچنین برای انجام بررسی به صورت عددی از یک مدل جدید المان محدود استفاده شده است. بررسی اثر این متغیرها بر سرعت امواج فراصوتی به روش عددی توسط نرم افزار اجزا محدود انسیس صورت گرفت. جهت مقایسه نتایج عددی و تئوری پارامترهای دو روش، یکسان در نظر گرفته شده است.

2- نحوه انتقال حرارت و شرایط مرزی در قطعه

دو صفحه نامتناهی موازی به فاصله L از یکدیگر را در نظر بگیرید دمای هر یک از این دو صفحه ثابت و به ترتیب مقادیر T_1 و T_2 است. در این حالت توزیع دما در راستای عمود بر دو صفحه و بین آنها به صورت خطی است [6]. این توزیع دما و در واقع شرایط دمایی، توزیع دمایی بسیار ساده برای ایجاد گرادیان درجه حرارت است و در نتیجه بررسی اثر گرادیان حرارتی بر روی سرعت امواج فراصوتی حجمی طولی به روش تئوری بسیار ساده‌تر و در عین حال بسیار پر کاربرد است. ایجاد دو صفحه موازی نامتناهی در عمل امکان‌پذیر نیست. بنابراین جهت ایجاد توزیع دمایی مشابه ولی قابل انجام به صورت تجربی استوانه‌ای که اطراف آن عایق‌بندی شده در نظر گرفته می‌شود. دو سطح انتهایی استوانه در دو دمای مختلف قرار دارند. سرعت امواج فراصوتی به صورت تئوری تحت این شرایط بدست می‌آید. حرارت از سطح زیر قطعه به آن منتقل می‌شود. دمای سطح زیرین قطعه T_2 و دمای سطح بالای قطعه T_1 فرض می‌شوند. طول قطعه در دمای محیط T_0 و دمای T_1 به ترتیب برابر L_0 و L در نظر گرفته می‌شود. همچنین فرض بر این است که دمای سطح زیرین از دما سطح بالایی بیشتر است. شکل 1 شرایط مرزی مسئله را نشان می‌دهد.

شرایط مرزی حرارتی و ارسال امواج فراصوتی به صورت متقارن محوری است. بنابراین برای بدست آوردن توزیع دما در استوانه می‌توان مسئله را به صورت دو بعدی حل کرد. شکل 2 شرایط مرزی حرارتی را در حالت متقارن محوری نشان می‌دهد.

معادله‌ی دما در حالت دو بعدی به صورت زیر است [7]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

شرایط مرزی مسئله مطابق شکل 2 عبارتند از:

$$T(r, L) = T_1 \quad (2)$$

$$T(r, 0) = T_2 \quad (3)$$

$$T_r(B, z) = 0 \quad (4)$$

در فاصله‌ی Δz_i دما ثابت و در نتیجه سرعت فراصوت نیز ثابت است. این سرعت C_i در نظر گرفته می‌شود. سرعت اندازه‌گیری شده توسط تراگذار تحت شرایط گرادیان حرارتی، C_m در نظر گرفته می‌شود. با توجه به معادله 26، معادله‌ی 27 بدست می‌آید.

$$\frac{L_f}{C_m} = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta z_i}{C_i} \quad (27)$$

بازه‌های Δz_i مقادیر کوچکی هستند و تعداد بازه‌ها بی‌شمار است. بنابراین معادله 27 به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\frac{L_f}{C_m} = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta z_i}{C_i} = \int_0^{L_f} \frac{dz}{C(z)} \quad (28)$$

معادله‌ی تغییرات سرعت فراصوت با تغییرات دما به صورت زیر است [9]:

$$C_T = C_1 \left[\left(1 + \frac{\beta}{E_1} (T - T_1) \right) (1 + 3\alpha(T - T_1)) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

در معادله 29، C_1 ، E_1 و β به ترتیب، سرعت امواج فراصوتی حجمی طولی در دمای T_1 ، مدول یانگ در دمای T_1 و پارامتر ویژه اثر دما بر مدول یانگ هستند. معادله‌ی تغییرات سرعت فراصوت با تغییرات فاصله‌ی z با توجه به معادله‌های 18 و 29 به صورت زیر است:

$$C(z) = C_1 \left[\left(1 - \frac{\beta\alpha}{E_1} (L - z) \right) (1 - 3\alpha\alpha(L - z)) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

با توجه به معادله‌های 28 و 30 معادله‌ی انتگرالی زیر بدست می‌آید:

$$\frac{L_f}{C_m} = \frac{1}{C_1} \int_0^{L_f} \frac{dz}{\sqrt{\left(1 - \frac{\beta\alpha}{E_1} (L - z) \right) (1 - 3\alpha\alpha(L - z))}} \quad (31)$$

و در نتیجه سرعت C_m توسط معادله زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$C_m = \left(C_1 L_f \int_0^{L_f} \frac{dz}{\sqrt{\left(1 - \frac{\beta\alpha}{E_1} (L - z) \right) (1 - 3\alpha\alpha(L - z))}} \right)^{-1} \quad (32)$$

برای حل انتگرال معادله 32 از تغییر متغیر زیر استفاده می‌کنیم:

$$A = -\frac{3\beta\alpha^2}{E_1} \quad (33)$$

$$B = 3\alpha\alpha \left(1 - \frac{\beta\alpha L}{E_1} \right) + \frac{(1 - 3\alpha\alpha L)\beta\alpha}{E_1} \quad (34)$$

$$C = \left(1 - \frac{\beta\alpha L}{E_1} \right) (1 - 3\alpha\alpha L) \quad (35)$$

با اعمال تغییر متغیر فوق سرعت C_m تئوری را به صورت صریح به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$C_m = \frac{\sqrt{AC_1} L_f}{\tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{A} (L_f - \frac{B}{2A})}{\sqrt{-AL_f^2 + BL_f + C}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{B}{2\sqrt{AC}} \right)} \quad (36)$$

معادله 36 بیانگر ارتباط میان پارامترهای وابسته به جنس قطعه و شرایط مرزی مسئله با سرعت امواج فراصوتی حجمی طولی در حضور گرادیان درجه حرارت است. این معادله تئوری برای اولین بار ارائه شده است.

4- بررسی اثر گرادیان حرارتی بر سرعت امواج فراصوتی

برای بررسی اثر گرادیان حرارتی بر روی سرعت امواج طولی به صورت تئوری از معادله 36 استفاده می‌شود. برای بررسی اثر هر یک از متغیرهای موجود در معادله 36 به صورت جداگانه باید سایر متغیرها را ثابت فرض کنیم. ثوابت و

$$T(r, z) = az + b \quad (15)$$

$$b = T_2 \quad (16)$$

$$a = -\frac{T_2 - T_1}{L} \quad (17)$$

در نتیجه معادله توزیع دما عبارت است از:

$$T = -\left(\frac{T_2 - T_1}{L} \right) z + T_2 \quad (18)$$

برای محاسبه گرادیان درجه حرارت از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{T_2 - T_1}{L} = a \quad (19)$$

مقادیر T_1 و T_2 به صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری هستند و برای محاسبه‌ی طول قطعه در حضور گرادیان درجه حرارت L_f از معادله 20 استفاده می‌شود [8]:

$$dL = zadT \quad (20)$$

در این معادله α ضریب انبساط حرارتی قطعه است. با توجه به معادله‌های 19 و 20 معادله‌ی زیر بدست می‌آید:

$$dL = aazdz \quad (21)$$

با توجه به شرایط مرزی از معادله 21 انتگرال گرفته می‌شود:

$$\int_{L_0}^{L_f} dL = \int_0^L aazdz \quad (22)$$

بنابراین با توجه به معادله‌های 19 و 22 معادله‌ی زیر بدست می‌آید:

$$L_f = L(1 - 0.5\alpha(T_2 - T_1)) \quad (23)$$

طول L از معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود [8]:

$$L = L_0(1 + \alpha(T_1 - T_0)) \quad (24)$$

با توجه به معادله‌های 24 و 23:

$$L_f = L_0(1 + \alpha(T_1 - T_0)) \left(1 + \frac{\alpha}{2}(T_2 - T_1) \right) \quad (25)$$

معادله 25 برای محاسبه‌ی طول L_f استفاده می‌شود.

3- معادله‌ی سرعت امواج فراصوتی

با تفسیم طول قطعه به بازه‌های کوچک و با ثابت فرض نمودن دما در هر یک از این بازه‌ها، معادله‌ی زیر برقرار است.

$$\Delta t = \sum_{i=1}^N \Delta t_i \quad (26)$$

در معادله 26، Δt و Δt_i به ترتیب، نصف تفاضل زمان دو سیگنال دریافتی متوالی و نصف مدت زمان عبور موج از فاصله‌ی Δz_i هستند. تعداد بازه‌ها در جهت z ، N در نظر گرفته شده است. شکل 3 فاصله‌ی Δz_i را نشان می‌دهد.

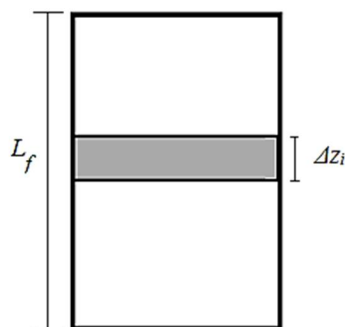


Fig. 3 The interval Δz_i on the work piece after applying the thermal gradient

شکل 3 بازه‌ی Δz_i بر روی قطعه پس از اعمال گرادیان درجه حرارت

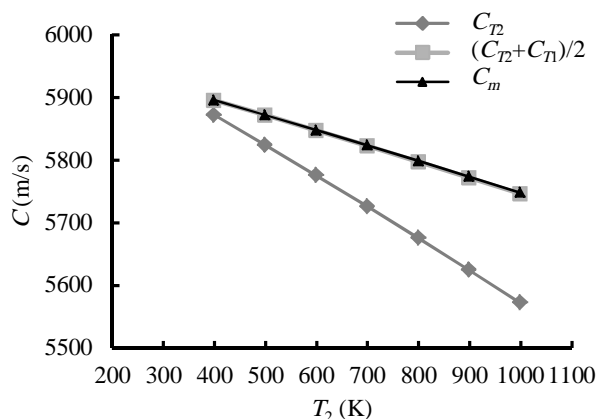


Fig. 4 The effect of temperature T_2 on velocity C_m , C_{T2} and $(C_{T1} + C_{T2})/2$, theoretically

شکل 4 اثر دمای T_2 بر سرعت C_m , C_{T2} و $(C_{T1} + C_{T2})/2$ به صورت تئوری

به صورت تئوری نشان می‌دهد.

5- بررسی اثر گرادیان حرارتی بر سرعت امواج فراصوتی به روش اجزاء محدود

جهت مقایسه نتایج تئوری با نتایج عددی از روش اجزاء محدود استفاده شده است. برای شبیه‌سازی فرایند ارسال و دریافت موج در حضور گرادیان حرارتی از نرم افزار انسیس استفاده شد. به دلیل وجود حالت تقارن محوری از المان‌های دو بعدی که دارای قابلیت تقارن محوری هستند، برای شبیه‌سازی استفاده شد. اندازه بهینه المان‌ها پس از انجام شبیه‌سازی‌های اولیه برابر یک بیستم طول موج امواج فراصوتی بدست آمد. فرایند شبیه‌سازی در دو مرحله متوالی صورت گرفت. مرحله اول، یک شبیه‌سازی حرارتی پایدار است. المان مورد استفاده در این مرحله المان صفحه‌ای 55 است. در مرحله اول، شرایط مرزی حرارتی و خواص مورد نیاز فولاد st37 اعمال می‌شود. نتیجه شبیه‌سازی در مرحله اول توزیع دما در قطعه است. شکل 5 توزیع دمای بدست آمده از مرحله اول شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

مرحله دوم، یک شبیه‌سازی سازه‌ای وابسته به زمان است. المان مورد استفاده در این مرحله المان صفحه‌ای 182 است. در مرحله دوم پس از انتقال هندسه، المان‌ها و خواص فولاد، توزیع دما بدست آمده در مرحله اول به

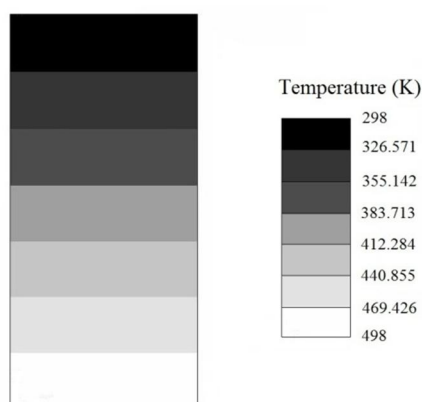


Fig. 5 Temperature distribution from steady state thermal simulation by finite element analysis

شکل 5 توزیع دمای بدست آمده از شبیه‌سازی حرارتی در حالت پایدار

مفروضات مورد استفاده در جدول 1 ارائه شده است. ثوابت α و β از مرجع [10] گرفته شده است. ثوابت C_1 و E_1 به روش فراصوتی اندازه‌گیری شده‌اند.

4-1- بررسی اثر طول قطعه بر سرعت C_m

برای بررسی اثر طول قطعه بر سرعت C_m ، دماهای سطح پایینی و بالایی قطعه ثابت فرض می‌شوند. این دماها به صورت دلخواه T_1 برابر 298 K و T_2 برابر 498 K در نظر گرفته می‌شوند. نتایج این بررسی در جدول 2 ارائه شده است.

مقدار میانگین سرعت امواج فراصوتی حجمی طولی در دماهای 298 K و 498 K برابر 5872.51 m/s است که این مقدار با اختلاف ناچیزی برابر C_m است. همچنین طبق جدول 2 مقدار C_m مستقل از طول L است.

4-2- بررسی اثر دمای سطح زیرین قطعه بر سرعت C_m

برای بررسی اثر دمای T_2 ، طول قطعه ثابت و به صورت دلخواه برابر 0.05 m و دمای T_1 برابر 298 K در نظر گرفته می‌شود. نتایج بررسی در جدول 3 ارائه شده است.

با توجه به جدول 3 اختلاف مقدار سرعت C_m و $(C_{T1} + C_{T2})/2$ با افزایش دما افزایش می‌یابد ولی این تفاضل ناچیز است. تغییرات C_m با افزایش دما به صورت خطی و به صورت کاهشی است. اختلاف بین C_m و C_{T2} با افزایش دما، افزایش می‌یابد. شکل 4 اثر دمای T_2 را بر سرعت C_m ، C_{T2} و

جدول 1 اطلاعات مورد استفاده برای بررسی تغییرات سرعت C_m در فولاد st37

| مقدار پارامتر | نوع پارامتر |
|-----------------------|----------------|
| 298 | T_0 (K) |
| 298 | T_1 (K) |
| 5920 | C_1 (m/s) |
| 11.6×10^{-6} | α (1/K) |
| -40.6×10^6 | β (Pa/K) |
| 210.8×10^9 | E_1 (Pa) |

جدول 2 اثر طول قطعه بر سرعت C_m و گرادیان درجه حرارت a

Table 2 The effect of work piece length on velocity C_m and thermal gradients a

| a (K/m) | C_m (m/s) | L (m) |
|-----------|-------------|---------|
| -4000 | 5872.7 | 0.05 |
| -3333.33 | 5872.7 | 0.06 |
| -2857.14 | 5872.7 | 0.07 |
| -2500 | 5872.7 | 0.08 |
| -2222.22 | 5872.7 | 0.09 |
| -2000 | 5872.7 | 0.1 |

جدول 3 اثر دمای T_2 بر سرعت C_m ، C_{T2} و $(C_{T1} + C_{T2})/2$

Table 3 The effect of temperature T_2 on velocity C_m , C_{T2} and $(C_{T1} + C_{T2})/2$

| C_m (m/s) | $(C_{T1} + C_{T2})/2$ (m/s) | C_{T2} (m/s) | T_2 (K) |
|-------------|-----------------------------|----------------|-----------|
| 5896.50 | 5896.45 | 5872.91 | 398 |
| 5872.70 | 5872.51 | 5825.03 | 498 |
| 5848.60 | 5848.17 | 5776.35 | 598 |
| 5824.18 | 5823.42 | 5726.84 | 698 |
| 5799.43 | 5798.24 | 5676.49 | 798 |
| 5774.35 | 5772.63 | 5625.27 | 898 |
| 5748.92 | 5746.58 | 5573.16 | 998 |

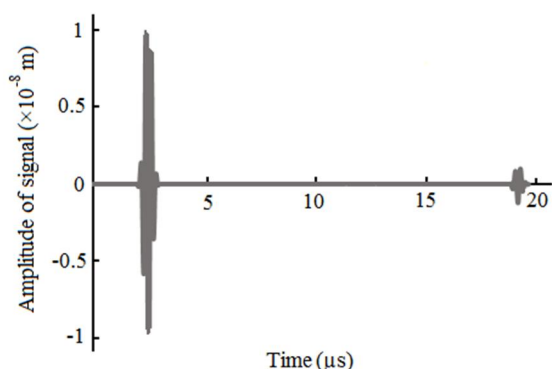


Fig. 8 The signal obtained from the center of the work piece in the second stage of the simulation process

شکل 8 سیگنال‌های بدست آمده از وسط قطعه در مرحله دوم فرایند شبیه‌سازی

برای بررسی اثر طول اولیه قطعه فرض می‌شود دماهای T_1 و T_2 به ترتیب برابر 298 K و 498 K هستند. نتایج بررسی در جدول 4 ارائه شد.

برای بررسی اثر دمای T_2 فرض می‌شود دمای T_1 و L به ترتیب برابر 298 K و 0.05 m هستند. نتایج بررسی در جدول 5 ارائه شد.

شکل 9 اثر دمای T_2 را بر سرعت C_m به صورت تئوری و شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

درصد خطا در فرایند شبیه‌سازی نسبت به روش تئوری کمتر از 0.5 % است که بیان‌گر تطابق خوب میان نتایج حاصل از دو روش است. با توجه به نتایج بدست آمده از روش‌های تئوری و المان محدود، موارد زیر مشاهده می‌شوند:

- تناظر یک به یکی بین مقدار گرادیان درجه حرارت و سرعت C_m وجود ندارد.

جدول 4 اثر طول قطعه بر سرعت C_m به روش تئوری و اجزاء محدود

Table 4 The effect of work piece length on velocity C_m in theoretical and finite element methods

| L (m) | C_m -Theoretical (m/s) | C_m -FEM (m/s) | Error (%) |
|------------|-----------------------------|---------------------|--------------|
| 0.05 | 5872.7 | 5854.9 | 0.303 |
| 0.06 | 5872.7 | 5854.8 | 0.305 |
| 0.07 | 5872.7 | 5861.98 | 0.183 |
| 0.08 | 5872.7 | 5861.18 | 0.196 |
| 0.09 | 5872.7 | 5860.4 | 0.209 |
| 0.1 | 5872.7 | 5862.37 | 0.176 |

جدول 5 اثر دمای T_2 بر سرعت C_m به روش تئوری و اجزاء محدود

Table 5 The effect of temperature T_2 on velocity C_m in theoretical and finite element methods

| T_2 (K) | C_m -Theoretical (m/s) | C_m -FEM (m/s) | Error (%) |
|--------------|-----------------------------|---------------------|--------------|
| 398 | 5896.5 | 5872.1 | 0.414 |
| 498 | 5872.7 | 5854.9 | 0.303 |
| 598 | 5848.6 | 5834.6 | 0.239 |
| 698 | 5824.17 | 5817.3 | 0.118 |
| 798 | 5799.43 | 5798.4 | 0.018 |
| 898 | 5774.35 | 5780.3 | 0.103 |
| 998 | 5748.92 | 5761.2 | 0.214 |

عنوان یک بار خارجی به قطعه اعمال می‌شود. امواج فراصوتی طولی حجمی در این مرحله به صورت جابجایی قسمتی از سطح بالایی قطعه به درون قطعه ارسال می‌شوند. فرکانس امواج ارسال شده 4 MHz است. شکل 6 نمودار سیگنال امواج فراصوتی ارسالی مورد استفاده در فرایند شبیه‌سازی است.

شکل 7 موج فراصوتی حجمی طولی ارسال شده به درون قطعه در مرحله دوم فرایند شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

در مرحله دوم، فاصله زمانی t بین دو سیگنال متوالی بازتاب شده از سطح پایینی قطعه به دست می‌آید. برای بدست آوردن این فاصله‌ی زمانی نمودار سیگنال‌های عبور کرده از نقطه وسط قطعه ترسیم می‌شود. شکل 8 نمونه‌ای از سیگنال‌های عبور کرده از وسط قطعه است.

سرعت C_m حاصل از مدل اجزاء محدود از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{m-FEM} = \frac{2Lf}{t} \quad (37)$$

مانند بررسی تئوری، اثر دو عامل مهم طول اولیه قطعه و دمای سطح پایینی قطعه به روش المان محدود، مطالعه می‌شود. همچنین نتایج این بررسی عددی با نتایج تئوری مقایسه شد.

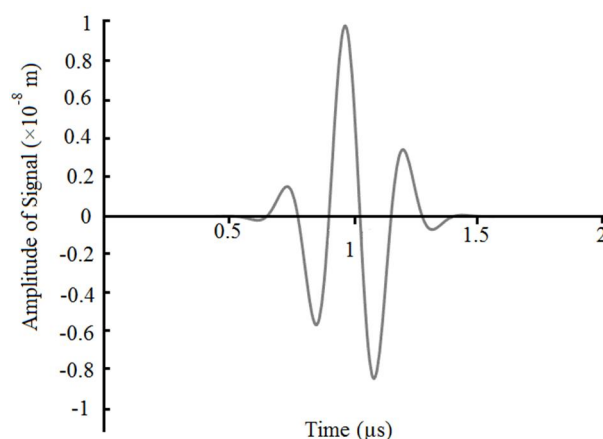


Fig. 6 The signal used in the simulation process

شکل 6 سیگنال ارسالی مورد استفاده در فرایند شبیه‌سازی

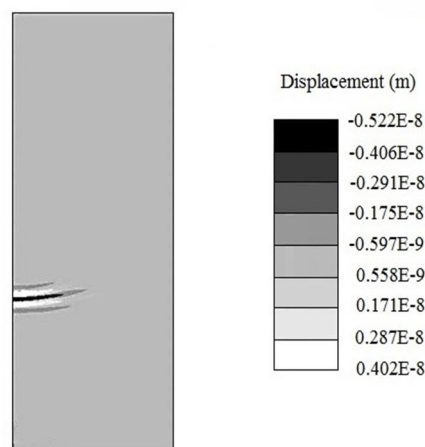


Fig. 7 The longitudinal ultrasonic bulk wave transmitted into the work piece in the second stage of the simulation process

شکل 7 موج فراصوتی حجمی طولی ارسال شده به درون قطعه در مرحله دوم فرایند شبیه‌سازی

دمای قسمت گرم قطعه با فرض ثابت بودن طول قطعه و دمای سطح بالایی، در محدوده دمایی 398-998 K بررسی شد. همچنین، یک مدل المان محدود دو بعدی جدید برای مسئله‌ای مشابه ایجاد شد. نتایج حاصل از مدل‌های تئوری و اجزاء محدود مقایسه شدند و تطابق بسیار خوبی بین نتایج حاصل از دو روش مشاهده شد. مدل تئوری توسعه داده شده را در حالتی که توزیع دما به صورت غیرخطی است نیز می‌توان توسعه داد. در این حالت امکان عدم دستیابی به معادله صریح تئوری برای بررسی اثر گرادیان درجه حرارت بر سرعت امواج فراصوتی (مانند معادله 36) وجود دارد. بنابراین، با توجه به تطابق بسیار خوب بین نتایج مدل تئوری و مدل اجزاء محدود ایجاد شده در حالت توزیع دمای خطی، می‌توان از مدل اجزاء محدود برای بررسی اثر گرادیان درجه حرارت بر سرعت امواج فراصوتی در حالت توزیع دمای غیر خطی استفاده کرد.

7- مراجع

- [1] V. Rajendran, N. Palanivelu, B. K. Chaudhuri, A device for the measurement of ultrasonic velocity and attenuation in solid materials under different thermal conditions, *Measurement*, Vol. 38, No. 3, pp. 248-256, 2005.
- [2] P. Palanichamy, A. Joseph, T. Jayakumar, B. Raj, Ultrasonic velocity measurements for estimation of grain size in austenitic stainless steel, *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 28, No. 3, pp. 179-185, 1995.
- [3] T. L. Szabo, J. Wu, A model for longitudinal and shear wave propagation in viscoelastic media, *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 107, No. 5, pp. 2437-2446, 2000.
- [4] A. Arhamnazi, F. Honarvar, Improvement of ultrasonic wave velocity measurements in steel components by using the SAGE algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 241-248, 2015. (in Persian)
- [5] D. E. Bray, R. K. Stanley, *Nondestructive Evaluation: a Tool in Design, Manufacturing, and Service*, pp. 57-59, Florida: CRC Press, 1997.
- [6] V. S. Arpaci, *Conduction Heat transfer*, pp. 37-40, Massachusetts: Addison-Wesley, 1966.
- [7] D. V. Hahn, M. N. Ozisik, *Heat Conduction*, pp. 128-131, New Jersey: John Wiley & Sons, 2012.
- [8] J. Walker, D. Halliday, R. Resnick, *Fundamentals of Physics*, Tenth Edition, pp. 520-522, New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.
- [9] T. Rommetveit, T. F. Johansen, R. Johnsen, A combined approach for high resolution corrosion monitoring and temperature compensation using ultrasound, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 59, No. 11, pp. 2843-2853, 2010.
- [10] T. Rommetveit, R. Johnsen, O. Baltzersen, *Using ultrasound measurements for real-time process control of pipelines and process equipment subjected to corrosion and/or erosion*, in *The NACE International Conference on Corrosion*, New Orleans, United State of America, 2008.

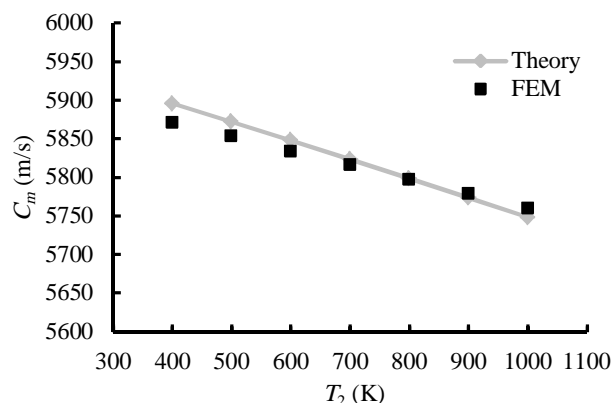


Fig. 9 The effect of temperature T_2 on the velocity C_m obtained from theory and numerical analysis

شکل 9 اثر دمای T_2 بر سرعت C_m به صورت عددی و تئوری

- در حضور توزیع دمای خطی، تغییرات C_m با افزایش دما در محدوده دمایی 398-998 K، تقریباً به صورت خطی و کاهشی است.
- در حضور توزیع دمای خطی، اختلاف بین C_m و C_{T2} با افزایش دما در محدوده دمایی 398-998 K، افزایش می‌یابد.
- در حضور توزیع دمای خطی، اختلاف مقدار سرعت‌های C_m و $(C_{T1} + C_{T2})/2$ با افزایش دما در محدوده دمایی 398-998 K، افزایش می‌یابد، ولی این تفاضل ناچیز است.
- در حضور توزیع دمای خطی، سرعت C_m مستقل از طول L و وابسته به دماهای T_1 ، T_2 و همچنین وابسته به جنس قطعه است.

6- نتیجه گیری

در این مقاله، اثر حضور گرادیان درجه حرارت در شرایط توزیع دمای خطی در قطعه بر روی سرعت موج فراصوتی بررسی شده است. در ابتدا، یک مدل ریاضی براساس معادله‌ی حرارت و معادله موج برای اولین بار توسعه داده شد. جهت ارزیابی معادله‌ی بدست آمده ابتدا دماهای دو سطح بالایی و پایینی قطعه ثابت فرض شد و اثر تغییرات طول قطعه در بازه 0.05-0.1 m بر روی سرعت امواج فراصوتی مورد بررسی قرار گرفت. سپس اثر تغییرات