

برآورد میدان تنش پسماند به کمک امواج فراصوت

خسرو نادران طحان* (دانشیار)

احسان دلخوش (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۲)
دردی ۲ - ۲۹، شماره ۲، ص. ۸۰-۷۵naderan_k@scu.ac.ir
ehsan.delkhosh@gmail.com

وجود تنش‌های پسماند در جسم گاهی باعث کاهش مقاومت جسم می‌شود. از همین رو تشخیص و برآورد این تنش‌ها در صنعت از اهمیت بسیاری برخوردار است. برای این منظور می‌توان از امواج فراصوت در آزمایش‌های غیرمخرب استفاده کرد. در روش استفاده از امواج فراصوت که مبتنی بر خواص آکوستوالاستیک^۱ مواد است، تغییرات سرعت انتشار امواج کشسان فراصوت هنگام عبور از میدان تنش‌های پسماند، بررسی می‌شوند. در این تحقیق، معادلات حرکت ذره در یک محیط کشسان سه‌بعدی نامحدود که تحت تنش قرار دارد، بررسی می‌شوند. سه مؤلفه‌ی خطی‌شده‌ی معادلات حرکت، مسئله‌ی کلی مقادیر ویژه را تشکیل می‌دهند. این مقادیر ویژه، سرعت امواج قابل انتشار در اجسام تحت تنش را تشکیل می‌دهند. با استفاده از معادلات به دست آمده، تغییرات سرعت برحسب تنش و کرنش یک‌بعدی در آلومینیوم، و همچنین تأثیر زاویه‌ی تابش موج بر سرعت انتشار آن در آلومینیوم و فولاد نشان داده شده است.

واژگان کلیدی: آزمون غیرمخرب، امواج فراصوت، تنش پسماند، آکوستوالاستیسیتیه.

۱. مقدمه

در تحلیل و طراحی قطعات، عدم اطلاع از میزان واقعی تنش به انتخاب ضریب اطمینان بالای قطعات می‌انجامد. تشخیص راستا و اندازه‌ی تنش‌های پسماند در اجسام به مهندسان و طراحان کمک می‌کند تا ضرایب اطمینان مناسب را انتخاب کنند. روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری تنش پسماند مورد استفاده قرار می‌گیرد که هر یک از آن‌ها علی‌رغم برخوردار بودن از امتیازها و قابلیت‌های متعدد، نقاط ضعفی نیز دارند. یکی از این روش‌ها، استفاده از امواج فراصوت است که بر خواص آکوستوالاستیسیتیه‌ی مواد استوار بوده و بر اثر آن سرعت انتشار این امواج، به تنش‌های موجود در جسم بستگی دارد.

با در نظر گرفتن معادلات حرکت و استفاده از ضرایب موسوم به ثابت‌های کشسان مرتبه‌ی دوم و سوم (جداول ۱ و ۲) -- که در تابع انرژی پتانسیل، برای توصیف رفتار ماده‌ی همسانگرد در تحلیل تغییر شکل‌های محدود تعریف می‌شوند^[۱] -- می‌توان میزان تأثیر تنش بر سرعت امواج مکانیکی طولی، برشی و سطحی را در اجسام برآورد کرد.^[۲-۴] از آنجا که تنش‌های پسماند هم در حجم و هم در مجاورت سطوح اجسام به‌طور غیریکنواخت توزیع می‌شوند، تلاش‌هایی صورت گرفته تا تشخیص و اندازه‌گیری میدان‌های تنش غیریکنواخت امکان‌پذیر شود.^[۵] داشتن مقادیر ثابت کشسانی مرتبه‌ی سوم برای ارزیابی تنش‌های پسماند ضروری است؛ از این رو به‌منظور تعیین دقیق این ضرایب برای بعضی از مواد پرکاربرد در مهندسی کارهای تجربی زیادی انجام گرفته است.^[۶] با به‌کارگیری روش‌های مورد اشاره، و نیز استفاده از تجهیزات مناسب اندازه‌گیری تنش‌های پسماند که معمولاً مبتنی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۱۰/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱۱/۱۹، پذیرش ۱۳۹۱/۴/۲۴.

بر اندازه‌گیری زمان پرواز یا حرکت موج در جسم‌اند، تلاش‌هایی برای تعیین این تنش‌ها در ورق‌های مسطح و قطعات جوشکاری شده، ورق‌های خمیده، دیسک‌های مدور، محل جوشکاری قطعات و لوله‌ها و میله‌های فولادی^[۷-۱۴] صورت گرفته است.

هدف تحقیق حاضر به دست آوردن رابطه‌ی است که نشان‌گر تغییرات سرعت انتشار امواج در جسم، در حضور تنش پسماند باشد. با در نظر گرفتن محیط به‌صورت نامتناهی، رابطه‌ی سرعت انتشار امواج حجمی در جسم تحت تنش، با استفاده از نظریه‌ی کشسانی محدود^۲ استخراج می‌شود.^[۱۵] همچنین تأثیر زاویه‌ی ورود موج بر سرعت عبور آن از درون جسم، ضرایب آکوستوالاستیسیتیه، سرعت نسبی و زمان پرواز موج و ارتباط آن با میدان تنش مورد مطالعه قرار می‌گیرد. امواج صفحه‌ی با دامنه‌ی کوچک فرض می‌شوند که در ساختار محیطی که در آن منتشر می‌شوند تغییری ایجاد نمی‌کنند (امواج کم‌شدت‌اند).

۲. انتشار امواج حجمی در جسم دارای تنش پسماند

معادلات حرکت یک ذره با مختصات مادی X_i ، بدون در نظر گرفتن نیروهای حجمی را می‌توان چنین نوشت:^[۱]

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

که در آن σ_{ij} مؤلفه‌های تانسور تنش در نقطه، ρ چگالی در حالت تغییر شکل نیافته،

جدول ۱. ثابت‌های کشسانی مرتبه‌ی دوم آلومینیوم و فولاد.

ν	E GPa	μ GPa	λ GPa	
۰٫۳۴	۷۱	۲۶٫۴۸	۵۹٫۲۸	آلومینیوم
۰٫۲۸	۲۲۰	۸۵	۱۱۰	فولاد

جدول ۲. ثابت‌های کشسانی مرتبه‌ی سوم آلومینیوم و فولاد.

n GPa	m GPa	l GPa	
-۴۰۸	-۴۰۱	-۳۱۱	آلومینیوم
-۷۱۰	-۵۸۰	-۲۷۰	فولاد

مشروط بر آن که نامساوی ۷ برقرار باشد:

$$u_i^{Static} \gg u_i^{Dynamic} \quad (7)$$

با این فرض که حرکت موج هارمونیک باشد، می‌توان معادله‌ی ۶ را به صورت معادله‌ی ۸ نوشت:

$$u_i = \varepsilon_i X_i + m_i A e^{i(\omega t - k_j x_j)} \quad (8)$$

که در آن کرنش‌های اصلی، ω فرکانس، m_i کسینوس‌های هادی بردار جابه‌جایی با محورهای اصلی، A دامنه‌ی جابه‌جایی و k_j مؤلفه‌های بردار موج است و قرارداد جمع فقط روی اندیس مکرر j صادق است. جمله‌ی اول نشان‌گر جابه‌جایی کشسان اولیه در جسم جامد همسانگردی است که تحت میدان تنش قرار گرفته است. جمله‌ی دوم نشان‌گر تغییر شکل بسیار کوچکی است که بر اثر انتشار موج صفحه‌یی از میان یک جسم ناهمسانگرد به وجود آمده است. مؤلفه‌های بردار موج (k_j) را می‌توان برحسب عدد موج (K) و کسینوس‌های هادی بردار موج l_j به صورت $k_j = Kl_j = \frac{l_j \pi}{\lambda}$ نوشت. با استفاده از رابطه‌ی بین مختصات مادی و فضایی، معادله‌ی ۸ را می‌توان برحسب مؤلفه‌های جابه‌جایی به دست آورد:

$$u_i = \varepsilon_i X_i + m_i A e^{i(\omega t - K((1+\varepsilon_1)X_1 l_1 + (1+\varepsilon_2)X_2 l_2 + (1+\varepsilon_3)X_3 l_3))} \quad (9)$$

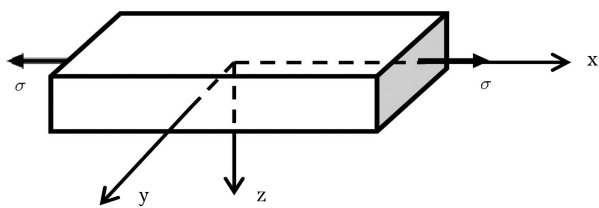
معادلات حرکت غیرخطی حاصل را که برحسب مشتقات جزئی تغییر مکان نوشته می‌شوند، با استفاده از بسط تیلور حول موقعیت تغییر شکل استاتیکی می‌توان خطی کرد. اگر $V = C_p = \frac{\omega}{K}$ بیان‌گر سرعت انتشار موج در جسم تحت تنش باشد، با دسته‌بندی پارامترهای A_i ، B_i و C_i برحسب کرنش‌های اصلی و ثابت‌های کشسانی مرتبه‌ی دوم و سوم، به‌گونه‌یی که در پیوست نوشته شده‌اند، این معادلات خطی شده در سه راستای X_1 ، X_2 و X_3 مطابق معادلات ۱۰ نوشته خواهد شد:

$$\begin{aligned} m_1(A_1 + A_2 + A_3) + m_2 A_2 + m_3 A_3 &= 0 \\ m_1 B_1 + m_2(B_2 + B_3 + B_4) + m_3 B_3 &= 0 \\ m_1 C_1 + m_2 C_2 + m_3(C_3 + C_4 + C_5) &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

۳. حل معادلات حرکت

۳.۱. انتشار موج در یک صفحه‌ی مشخص

اگر موج در یک صفحه‌ی مشخص منتشر شود، می‌توان معادلات حرکت را ساده‌تر کرد. بدین منظور جسم مورد مطالعه را در دستگاه مختصات دکارتی (شکل ۱) چنان



شکل ۱. دستگاه مختصات و نمایش صفحات انتشار موج.

و u_i مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی از X_i به مختصات فضایی x_i است. قرارداد جمع روی اندیس تکراری برقرار بوده و $u_i = x_i - X_i$ و $x_i = x_i(X_1, X_2, X_3)$ مؤلفه‌های تانسور تنش با مشتق‌گیری از تابع چگالی انرژی کرنشی کشسانی جسم در حالت تغییر شکل نیافته (ϕ) ، برحسب مؤلفه‌های کرنش محدود لاگرانژی (E) به صورت معادله‌ی ۲ نوشته می‌شوند:

$$[\sigma] = [J] \left[\frac{\partial \phi}{\partial E} \right] \quad (2)$$

تانسور کرنش محدود لاگرانژی برحسب ژاکوبین J و تانسور واحد (I) نیز به صورت معادله‌ی ۳ نوشته می‌شود:

$$E = \frac{1}{2} (J^T J - I) \quad (3)$$

ماتریس ژاکوبین از رابطه‌ی ۴ قابل محاسبه است:

$$[J] = \left[\frac{\partial x_i}{\partial X_i} \right] \quad (4)$$

چگالی انرژی کرنشی برای یک جامد کشسان همسانگرد به صورت تابعی از سه مقدار پایای I_1, I_2, I_3 تانسور کرنش لاگرانژی نوشته می‌شود: [۱۰]

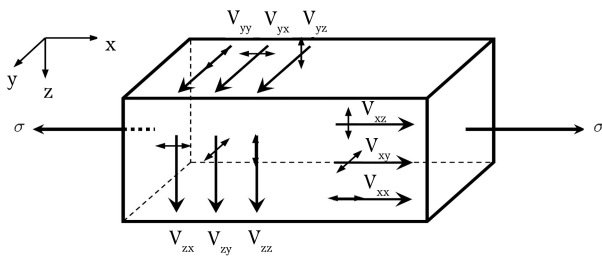
$$\phi = \frac{l + 2m}{3} I_1^2 + \frac{\lambda + 2\mu}{2} I_1^2 - 2m I_1 I_2 - 2\mu I_2 + n I_3 \quad (5)$$

که در آن l و m و n سه مقدار ثابت جدید ماده به نام ثابت‌های کشسانی مرتبه‌ی سوم هستند که با آزمایش باید تعیین شوند. در جدول ۲ این مقادیر برای آلومینیوم و فولاد ارائه شده‌اند.

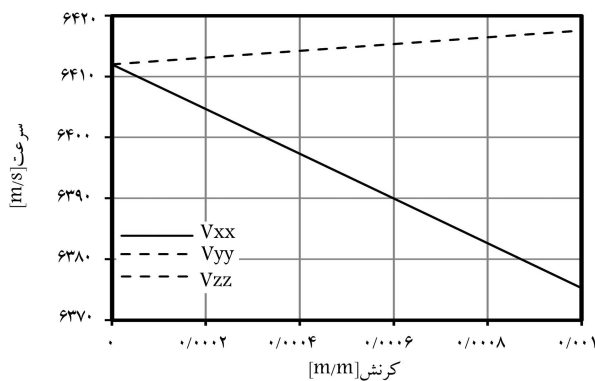
با قراردادن معادلات ۳ تا ۵ در معادله‌ی ۲، و جایگزینی عبارت‌های حاصل برای تنش‌ها در معادله‌ی ۱، معادلات حرکت غیرخطی در جهت‌های X_1, X_2, X_3 به دست می‌آید.

اگر جابه‌جایی هر نقطه از محیط ترکیبی از دو بخش در نظر گرفته شود: ۱. بخش استاتیکی (u_i^{Static}) که ممکن است بر اثر وجود یک میدان تنش پسماند یا تنش اولیه ایجاد شده باشد؛ ۲. بخش دینامیکی $(u_i^{Dynamic})$ که بر اثر انتشار امواج صفحه‌یی کم‌دامنه به وجود می‌آید، مؤلفه‌های جابه‌جایی در مختصات کارتزین را می‌توان چنین نوشت:

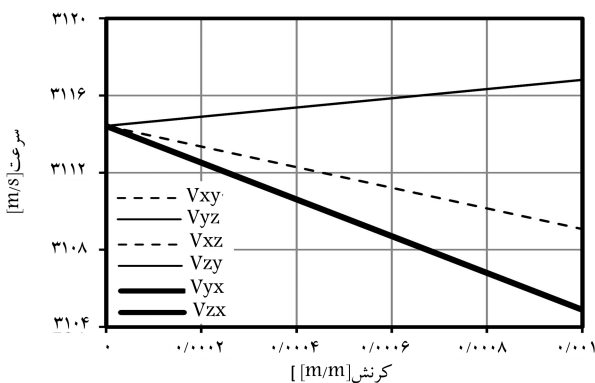
$$u_i^{Total} = u_i^{Static} + u_i^{Dynamic}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$



شکل ۲. راستای انتشار امواج طولی و عرضی، وقتی موج در امتداد یکی از محورها بتابد.



شکل ۳. تغییرات سرعت امواج طولی در آلومینیوم اگر موج در امتداد تنش منتشر شود.



شکل ۴. تغییرات سرعت امواج عرضی در آلومینیوم اگر موج در امتداد تنش منتشر شود.

اگر موج مثلاً در امتداد محور x (هم‌راستا با تنش) منتشر شود، $l_1 = 1$ و $l_2 = l_3 = 0$. با جایگزینی این مقادیر در معادلات حرکت و ساده‌سازی مقادیر ویژه، روابط ۱۶ به دست می‌آید که در آن‌ها اندیس اول سرعت نشان‌گر راستای انتشار موج، و اندیس دوم نشان‌گر راستای ارتعاش یا حرکت ذرات جسم است (ثابت‌های a_i در پیوست تعریف شده‌اند):

$$\begin{aligned} \rho \cdot V_{ii}^T &= a_1 + a_2 \varepsilon_i + a_3 (\varepsilon_j + \varepsilon_k) \\ \rho \cdot V_{ij}^T &= \mu + a_4 \varepsilon_i + a_5 \varepsilon_j + a_6 \varepsilon_k \\ \rho \cdot V_{ik}^T &= \mu + a_5 \varepsilon_i + a_6 \varepsilon_j + a_4 \varepsilon_k \end{aligned} \quad (16)$$

در نمودارهای شکل‌های ۳ و ۴، تغییرات سرعت امواج برای سه مود طولی و شش مود عرضی نسبت به تنش یا کرنش یک‌بعدی، در صورتی که موج در امتداد تنش درون

در نظر می‌گیریم که جهت‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب منطبق بر محورهای x ، y ، z باشد. کسینوس‌های هادی بردار موج در رابطه‌ی ۱۱ صدق می‌کند:

$$l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 = 1 \quad (11)$$

چنانچه موج در صفحه‌ی xz منتشر شود، $l_2 = 0$ و معادلات حرکت ذره چنین نوشته می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} G_{11} - \rho \cdot V^T & 0 & G_{13} \\ 0 & G_{22} - \rho \cdot V^T & 0 \\ G_{31} & 0 & G_{33} - \rho \cdot V^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

مقادیر G_{ij} در پیوست نوشته شده‌اند.

برای این که دستگاه معادلات ۱۲ جواب غیربدهی داشته باشد باید دترمینان ضرایب آن برابر صفر باشد. به این ترتیب معادله‌ی مشخصه‌ی امواج قابل انتشار در جسم به دست می‌آید. ریشه‌های این معادله، مقادیر ویژه‌ی دستگاه معادلات ۱۲ هستند و سرعت انتشار یک مود عرضی افقی (SH)، یک مود عرضی عمودی (SV) و یک مود طولی (L) به دست می‌آیند:

$$\Gamma_1 = \rho \cdot V_1^T = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[G_{11} + G_{33} + \sqrt{(G_{11} - G_{33})^2 + 4G_{13}^2} \right]$$

$$\Gamma_2 = \rho \cdot V_2^T = G_{22}$$

$$\Gamma_3 = \rho \cdot V_3^T = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[G_{11} + G_{33} - \sqrt{(G_{11} - G_{33})^2 + 4G_{13}^2} \right] \quad (13)$$

می‌توان هر یک از این عبارت‌ها را با استفاده از سری تیلور بسط داد و خطی کرد. به‌عنوان مثال:

$$\begin{aligned} \Gamma_1^{(xz)} &= \rho \cdot V_1^T = f(\varepsilon) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[G_{11} + G_{33} - \sqrt{(G_{11} - G_{33})^2 + 4G_{13}^2} \right] \\ &= f(0) + \left\{ \left[\frac{\partial f}{\partial G_{11}} \frac{\partial G_{11}}{\varepsilon_i} + \frac{\partial f}{\partial G_{13}} \frac{\partial G_{13}}{\varepsilon_i} + \frac{\partial f}{\partial G_{33}} \frac{\partial G_{33}}{\varepsilon_i} \right] \right\} \varepsilon_i \end{aligned} \quad (14)$$

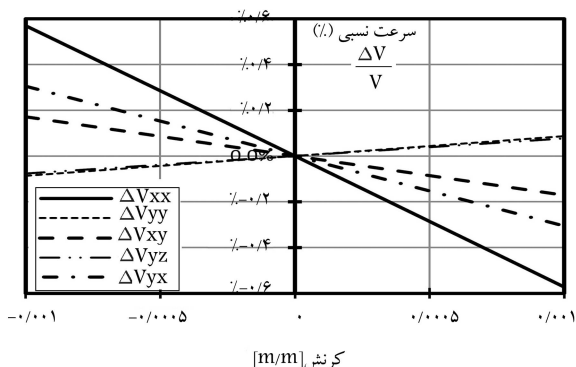
مشابه عملیات فوق برای انتشار امواج در دو صفحه‌ی دیگر نیز انجام شده است، [۱۶]. ولی برای رعایت اختصار از آوردن جزئیات محاسبات خودداری می‌شود.

۲.۳. حالت تنش یک‌بعدی

در صورت وجود میدان تنش یک‌بعدی (σ) در جسم، می‌توان معادلات حرکت را ساده‌تر کرد. برای این حالت که تنش یا کرنش متناسب است، با در نظر گرفتن ضریب پواسون (ν) و مدول یانگ (E)، کرنش‌ها چنین نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_3 = -\nu \varepsilon \end{aligned} \quad (15)$$

اگر موج عمود بر سطح جسم وارد شود ممکن است در امتداد جهت‌های اصلی انتشار یابد. در شکل ۲ راستای انتشار امواج طولی و عرضی در سه جهت اصلی x ، y ، z نسبت به تنش یک‌بعدی نشان داده شده است.

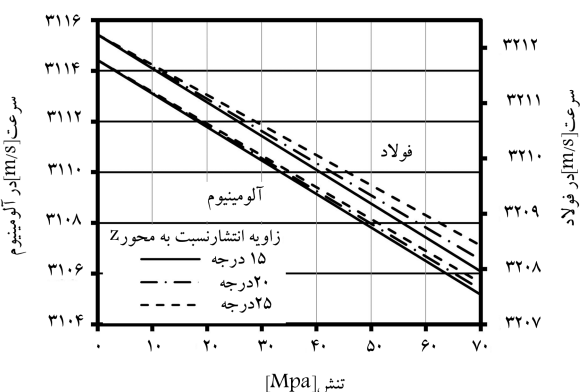


شکل ۵. نمودار تغییرات نسبی سرعت امواج در حالت تنش یک بعدی برای آلومینیوم.

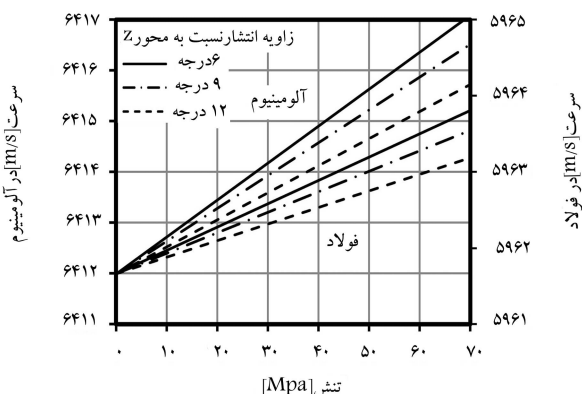
را به دست آورد. اگر این فرایند برای نقاط مختلف مقطع تکرار شود، می توان تغییرات تنش برحسب فاصله ی نقاط مختلف تا یک سطح مرجع را ترسیم کرد.

۴.۳. تأثیر زاویه ی انتشار بر سرعت موج

برای مطالعه ی تأثیر زاویه ی انتشار بر سرعت امواج برشی و طولی می توان از روابط ۱۳ که برحسب تنش یک بعدی مرتب شده باشند، استفاده کرد. به عنوان مثال اگر زاویه ی انتشار موج برشی با محور z، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه و برای موج طولی، ۶، ۹ و ۱۲ درجه باشد، نمودار تغییرات سرعت امواج برشی در آلومینیوم و فولاد طبق شکل ۶ و برای امواج طولی طبق شکل ۷ خواهد شد.



شکل ۶. تغییرات سرعت موج برشی در آلومینیوم و فولاد بر اثر تغییر زاویه ی انتشار.



شکل ۷. تغییرات سرعت موج طولی آلومینیوم و فولاد بر اثر تغییر زاویه ی انتشار.

جسم انتشار یابد (شکل ۲)، برای جسم آلومینیومی با چگالی $\rho_0 = 2730 \text{ kg/m}^3$ رسم شده است. با توجه به نمودار شکل ۳، سرعت موج طولی در راستای تنش محوری کششی، بر اثر افزایش تنش یا کرنش کاهش می یابد در حالی که برای موج طولی منته شده در جهات عمود بر راستای تنش افزایش می یابد. نمودارهای شکل ۴ نشان می دهند که سرعت امواج عرضی یا برشی، بسته به این که امتداد انتشار و حرکت ذرات محیط برای آن ها عمود یا منطبق بر امتداد تنش باشند، تغییر می کنند. این نمودارها نشان می دهند که سرعت بعضی از مودها به علت تقارن بر یکدیگر منطبق می شود. تأثیر زاویه ی انتشار بر سرعت امواج در بخش ۴.۳ بررسی شده است.

۳.۳. تغییرات سرعت نسبی

یکی از پارامترهای مورد توجه در روش اندازه گیری تنش به کمک امواج فراصوت، تغییرات نسبی سرعت موج برحسب تنش یا کرنش محوری است. مطابق رابطه ی ۱۷ سرعت نسبی عبارت است از:

$$\Delta V_{ij} = \frac{V_{ij} - V_{ij}^0}{V_{ij}^0} \quad (17)$$

که در آن V_{ij}^0 سرعت موج در محیط بدون تنش است. چنانچه از رابطه ی ۱۷ نسبت به کرنش (ε) مشتق گرفته شود خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta V_{11}}{d\varepsilon} &= \frac{a_1 - 2a_1\nu}{2a_1} = L_{11} \\ \frac{d\Delta V_{12}}{d\varepsilon} &= \frac{a_5 - (a_6 + a_7)\nu}{a_5 - a_7} = L_{12} \\ \frac{d\Delta V_{21}}{d\varepsilon} &= \frac{a_7 - (a_5 + a_6)\nu}{a_5 - a_7} = L_{21} \\ \frac{d\Delta V_{22}}{d\varepsilon} &= \frac{a_6 - (a_6 + 2a_5 - a_7)\nu}{a_5 - a_7} = L_{22} \\ \frac{d\Delta V_{33}}{d\varepsilon} &= \frac{a_2 - (a_2 + a_2)\nu}{2a_1} = L_{33} \end{aligned} \quad (18)$$

L_{ij} ضرایب آکوستوالاستیسیته نامیده می شوند و ثابت های a_i در پیوست تعریف شده اند. مقادیر این ضرایب برای آلومینیوم با استفاده از ثابت های کشسانی مرتبه ی دوم و سوم آلومینیوم و فولاد با چگالی 2730 kg/m^3 (مندرج در جداول ۱ و ۲) محاسبه و در جدول ۳ درج شده اند.

به کمک این روابط، تغییرات نسبی در جهات مختلف برای آلومینیوم و در حالت تنش یک بعدی در شکل ۵ رسم شده اند. در نمودارهای این شکل، بیشترین تغییرات سرعت نسبی به ازای کرنش 0.01 در آلومینیوم، کم تر از 0.06% است. در آزمایش هایی که جسم تحت تنش یک بعدی قرار دارد، به جای سرعت انتشار موج، زمان پرواز یا حرکت موج اندازه گیری می شود. مدت زمان انتشار موج در نمونه در روش پالس - کوکوا برابر است با: $V_p = \frac{2h}{\Delta t}$ ، که در آن h ضخامت قطعه، Δt زمان پرواز موج، و V_p سرعت موج عرضی در صفحه ی xz است. با اندازه گیری زمان پرواز موج و فاصله یی که موج حرکت می کند، سرعت موج محاسبه می شود. از طریق انتقال این سرعت روی محور سرعت ها در شکل های ۳ و ۴، می توان تنش نظیر آن

جدول ۳. ضرایب آکوستوالاستیسیته ی آلومینیوم.

	L_{33}	L_{22}	L_{21}	L_{12}	L_{11}
آلومینیوم	۰٫۸۶۷	۷۶۷۱۹۰۰	-۳٫۰۵۴	-۱٫۷۱۴	-۵٫۷۱۲
فولاد	۰٫۲۷۴	۰٫۱۳۱	-۱٫۴۱۸	-۰٫۱۱۸	-۲٫۲۸۳

برای آن‌ها عمود بر امتداد تنش است، سرعت انتشار موج وقتی که تنش کششی باشد افزایش می‌یابد. این نتیجه‌گیری‌ها، با بررسی روابط موجود^[۱۵] نیز تأیید می‌شوند. اگر امواج تحت زاویه نسبت به سطح جسم منتشر شوند نتیجه برعکس خواهد بود. با استفاده از پدیده‌ی آکوستوالاستیسیته و محاسبه‌ی سرعت موج فراصوت عبوری از جسم، می‌توان مقدار تنش‌های مکانیکی موجود در ماده را اندازه‌گیری کرد. این تنش می‌تواند تنش اعمالی یا تنش پسماند باشد. چنان که از نمودارهای سرعت برحسب کرنش و تنش پیداست، تغییرات سرعت امواج فراصوت تابعی خطی از کرنش و تنش موجود در جسم است. از مقایسه‌ی شیب تغییرات سرعت نسبی ملاحظه می‌شود که تغییرات سرعت نسبی برای امواج طولی که در امتداد تنش منتشر می‌شوند نسبت به سایر مودها بیشتر است، لذا توصیه می‌شود در بازرسی‌ها استفاده از این مود در اولویت قرارگیرد. چون زمان پرواز موج در کرنش‌های مختلف عددی کوچک است، باید در اندازه‌گیری آن نهایت دقت به عمل آید.

به عکس آنچه از شکل‌های ۳ و ۴ استنباط می‌شود، در این نمودارها می‌بینیم که اگر امواج تحت زاویه‌ی غیر از صفر نسبت به سطح نمونه منتشر شوند، سرعت امواج برشی با تنش‌های کششی کاهش و سرعت امواج طولی افزایش می‌یابد.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده در این پژوهش حاکی از آن است که سرعت امواج فراصوت به جنس ماده، جهت و اندازه‌ی تنش، امتداد انتشار موج نسبت به راستای تنش و امتداد حرکت ذرات محیط (طولی یا عرضی بودن موج) بستگی دارد. چنانچه امتداد انتشار موج و تنش یکسان باشد برای تنش کششی، سرعت موج طولی کاهش و برای تنش فشاری، سرعت آن افزایش می‌یابد. برای امواج برشی که امتداد حرکت ذرات

پانویس‌ها

1. Acoustoelasticity
2. finite deformation theory
3. Jacobian
4. Pulse-Eco

منابع (References)

1. Murnaghan, F.D., *Finite Deformation of an Elastic Solid*, Applied Mathematics Series, Wiley, New York (1951).
2. Hughes, D.S. and Kelly, J.L. "Second-order elastic deformation of solids", *Physical Review*, **92**(5), pp. 1145-1149 (1953).
3. Husson, D. and Kino, G.S. "A perturbation theory for acoustoelastic effects", *J. Appl. Phys.*, **53**(11), pp. 7250-7258 (1982).
4. Husson, D. "A perturbation theory for acoustoelastic effect of surface waves", *J. Appl. Phys.*, **57**(5), pp. 1562-1568 (1985).
5. Delsanto, P.P., Olivero, G. and Scalerandi, M. "Acousto-elastic effects in elastic media with nonuniform initial stress", *Res Nondestr Eval*, **12**, pp. 105-118 (2000).
6. Crecraft, D.I. "The measurement of applied and residual stresses in metals using ultrasonic waves", *Journal of Sound and Vibration*, **5**(1), pp. 173-192 (1967).
7. Kudryavtsev, Y. and Kleiman, J., *Ultrasonic Technique and Device for Residual Stress Measurement*, Integrity Testing Laboratory Inc., 80 Esna Park Drive, Units 7-9, Markham, Ontario, L3R 2R7 Canada.
8. Kumar, R. and Partap, G. "Wave propagation in circumferential direction in micropolar cylindrical curved plate", *International Journal of Mechanics and Solids*, ISSN 0973-1881, **4**(1), pp. 117-125 (2009).
9. Blessing, G.V., Hsu, N.N. and Proctor, T.M. "Ultrasonic shear wave measurement of known residual stress in aluminum", *Experimental Mechanics*, **24**(3), pp. 218-222 (1984).
10. Qu, J., He, Y., Yang, Y., Wang, Y. and Tian, C. "Research on ultrasonic measurement for the welding residual stress in the ring welded seam for a RPV plate", *Transactions of the 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 14)*, pp. 417-424 (1997).
11. Tanala, E., Bourse, G., Fremiot, M. and De Belleval, J.F. "Determination of near surface residual stresses on welded joints using ultrasonic methods", *NDT & E International*, **28**(2), pp. 83-88 (1995).
12. Akhshik, S. and Moharrami, R. "Improvement in accuracy of the measurements of residual stresses due to circumferential welds in thin-walled pipe using Rayleigh wave method", *Nuclear Engineering and Design*, **239**(10), pp. 2201-2208 (2009).
13. Rizzo, P. and Lanza di Scalea, F. "Effect of frequency on the acoustoelastic response of steel bars", *Experimental Techniques*, pp. 40-43 (November-December 2003).
14. Schmerr, L.W., and Song, S.-J., *Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems: Models and Measurements*, Springer, New York (2007).
15. Rose, J.L., *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., New York (1999).
16. Delkshosh, E. "Investigation of residual stresses in materials using ultrasonic waves", M.Sc. Thesis, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz, Iran (2011).

پیوست

دسته‌بندی ثابت‌های کشسانی مرتبه‌ی دوم و سوم مواد (α_i) و ضرایب معادلات حرکت (G_{ij}, C_i, B_i, A_i) :

$$A_r = l_1 l_r (a_0 + a_v (\varepsilon_1 + \varepsilon_r) + a_\lambda \varepsilon_r)$$

$$A_\delta = l_1 l_r (a_0 + a_v (\varepsilon_1 + \varepsilon_r) + a_\lambda \varepsilon_r)$$

$$B_1 = A_r$$

$$B_r = -\rho_s V^T + l_1^v (\mu + a_\delta \varepsilon_1 + a_r \varepsilon_r + a_\phi \varepsilon_r)$$

$$B_r = l_r^v (a_1 + a_r \varepsilon_r + a_r (\varepsilon_1 + \varepsilon_r))$$

$$B_r = l_r^v (\mu + a_\phi \varepsilon_1 + a_r \varepsilon_r + a_\delta \varepsilon_r)$$

$$B_\delta = l_1 l_r (a_0 + a_\lambda \varepsilon_1 + a_v (\varepsilon_r + \varepsilon_r))$$

$$C_1 = A_\delta$$

$$C_r = l_r l_r (a_0 + a_v (\varepsilon_r + \varepsilon_r) + a_\lambda \varepsilon_1)$$

$$C_r = -\rho_s V^T + l_1^v (\mu + a_\delta \varepsilon_1 + a_\phi \varepsilon_r + a_r \varepsilon_r)$$

$$C_r = l_r^v (\mu + a_\phi \varepsilon_1 + a_\delta \varepsilon_r + a_r \varepsilon_r)$$

$$C_\delta = l_r^v (a_1 + a_r \varepsilon_r + a_r (\varepsilon_1 + \varepsilon_r))$$

$$G_{11} = A_1 + A_r + \rho_s V^T$$

$$G_{1r} = A_\delta$$

$$G_{rr} = B_r + B_r + \rho_s V^T$$

$$G_{rr} = C_r + C_\delta + \rho_s V^T$$

$$G_{r1} = G_{1r} = C_1 = A_\delta$$

$$a_0 = \lambda + \mu$$

$$a_1 = \lambda + 2\mu$$

$$a_r = 5\lambda + 10\mu + 2l + 4m$$

$$a_r = \lambda + 2l$$

$$a_r = \lambda + 2\mu + m$$

$$a_\delta = \lambda + 4\mu + m$$

$$a_\phi = \lambda + m - \frac{1}{\gamma} n$$

$$a_v = 2(\lambda + \mu) + 2l + m$$

$$a_\lambda = -m + \frac{1}{\gamma} n + 2l$$

$$A_1 = -\rho_s V^T + l_1^v (a_1 + a_r \varepsilon_1 + a_r (\varepsilon_r + \varepsilon_r))$$

$$A_r = l_r^v (\mu + a_r \varepsilon_1 + a_\delta \varepsilon_r + a_\phi \varepsilon_r)$$

$$A_r = l_r^v (\mu + a_r \varepsilon_1 + a_\phi \varepsilon_r + a_\delta \varepsilon_r)$$

RESIDUAL STRESS FIELD ESTIMATION BY ULTRASONIC WAVES

K. Naderan Tahan(corresponding author)

naderan_k@scu.ac.ir

E. Delkhosh

ehsan.delkhosh@gmail.com

**Dept. of Enginnering College of Mechanics,
Shahid Chamran University of Ahvaz**

Sharif Mechanical Engineering Journal

Volume 29, Issue 2, Page 75-80, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 7 January 2012; received in revised form 7 April 2012; accepted 24 June 2012.

Abstract

In certain cases, the presence of residual stress reduces the strength of parts, hence, its detection and estimation is of great importance. Ultrasonic waves have the potential to be employed in nondestructive tests to do this task. The analysis is based on the acoustoelasticity properties of the material that studies changes in wave velocity when passing through a stressed medium. To derive the equations of motion for a particle in a stressed elastic solid, it is supposed that the displacement vector consists of two parts: a static part, which may be developed by a residual or applied stress field, and a dynamic part, which is produced due to wave propagation and is considered a small amplitude harmonic motion. The finite displacement theory is employed to derive the general form of the non linear equations of motion in three dimensions for an incident wave at various angles, which are made linear by the Taylor expansion method. Various components of the wave velocity are computed from linear equations as an eigenvalue problem. Relative velocity changes versus one dimensional stress and strain in an aluminum block, and the effect of wave incidence angle on the propagation velocity are established and plotted. It is shown that the speed of wave in a stressed elastic solid depends not only on the material properties of the solid, but, also, on the wave incidence angle and the propagation and particle displacement direction relative to the stress direction. From the presented diagrams, it is revealed that if the direction of incidence

and propagation of the wave coincides with the direction of normal stress, then, the velocity of the longitudinal mode will decrease in tension and increase in compression. On the other hand, the velocity of shear wave will increase in tension and decrease in compression. These conclusions agree with the results in other references. Comparing the slope of relative velocity diagrams in a stressed body, we conclude that the velocity of longitudinal waves that are incident along the normal stress component, is greater than other wave modes, although the magnitude of this change is very small for either modes; say, about 0.6 percent for longitudinal waves at 70 MPa tension in aluminum. Therefore, precise measurement of the flight time of the wave is necessary.

Key Words: residual stress, ultrasonic wave, non destructive test, acoustoelasticity.