

Numerical Modeling of Local Residual Stress Detection in Thin Plates Using Fundamental Antisymmetric Mode of Ultrasonic Lamb Waves

Behzad Maddah Alghalandis¹, Hossein Sahhaf Naeini², Mohammad Hossein Soorgee^{3*}, Seyed Ebrahim Moussavi Torshizi⁴

1- MSc Student, Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- MSc, Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

4- Associate Professor, Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

*mh_soorgee@sbu.ac.ir

Abstract

Residual stresses occur in different processes such as plastic deformation, temperature variation and structural changes. Welding and metal deformation are conventional processes which lead to residual stress. Residual stress plays a key role in the characterization of welded structures, and it has a significant effect on fatigue behavior as well as the lifespan of loaded structures. Therefore, at the first step, measuring residual stress, and in the next level taking action to reduce or eliminate it by usual methods are of extreme significance. In this study, Lamb waves were applied to evaluate the local residual stress in thin steel plates. A two-dimensional hyperelastic nonlinear model on which a Lamb wave propagated was simulated in ABAQUS CAE finite element software. In order to create residual stress, loading was applied to the thin plate either perpendicular or parallel to the wave motion direction. In different frequencies and stresses, the behavior of A_0 mode was scrutinized. Results indicated that A_0 mode was sensitive to stress changes, and its changes against the residual stress followed a specific trend. In addition, sensitivity to residual stress decreases with increasing frequency. Hence, the frequency of 50 kHz is selected as the optimal frequency in inspecting thin steel plates.

Keywords: Residual stress, Lamb waves, Acoustoelasticity, Thin plates, Finite element method.

مدل سازی عددی تشخیص تنش پسماند موضعی در ورق های نازک به وسیله مد نامتقارن بنیادی امواج فراصوتی لمب

بهزاد مداح الفلندیس^۱، حسین صحاف نائینی^۲، محمدحسین سورگی^{۳*}، سیدابراهیم موسوی ترشیزی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی تهران

۲- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی تهران

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی تهران

۴- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی تهران

*mh_soorgee@sbu.ac.ir

چکیده

تنش های پسماند در فرایندهای مختلفی نظیر تغییر شکل های پلاستیک، تغییرات دما و یا تغییرات ساختاری رخ می دهد. مرسوم ترین موارد تشکیل تنش پسماند، فرایندهای جوشکاری و شکل دهی فلزات می باشد. تنش پسماند تأثیر قابل توجهی بر روی رفتار خستگی و طول عمر سازه های بارگذاری شده دارد. به همین علت در مرحله اول اندازه گیری تنش پسماند و در گام بعدی اقدام برای کاهش و یا حذف آن با روش های معمول از اهمیت بسزایی برخوردار می باشد. در پژوهش حاضر از امواج لمب به منظور ارزیابی تنش پسماند موضعی در ورق های نازک فولادی استفاده شده است. یک مدل غیرخطی هایپر الاستیک به صورت دوبعدی در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس شبیه سازی شده و موج لمب بر روی آن منتشر گردیده است. بارگذاری برای ایجاد تنش پسماند یکبار عمود بر جهت انتشار موج و باردیگر موازی با جهت انتشار موج به صورت موضعی به ورق نازک اعمال شده است. رفتار مد A0 در فرکانس های مختلف و مقادیر متفاوت تنش بررسی گردیده و مشخص شد که مد A0 نسبت به تغییرات تنش حساس بوده و تغییر نتایج آن نسبت به تغییر فشار پسماند دارای روند مشخصی است. همچنین با افزایش فرکانس حساسیت به تنش پسماند کاهش می یابد. بنابراین فرکانس ۵۰ کیلوهرتز به عنوان فرکانس مطلوب در ارزیابی تنش های پسماند موضعی یک ورق فولادی به ضخامت ۱/۲ میلیمتر انتخاب گردیده است.

واژگان کلیدی: تنش پسماند، امواج لمب، آکوستوالاستیسیته، ورق نازک، روش اجزاء محدود.

۱- مقدمه

می تواند مفید باشد، به عنوان مثال در سازه هایی نظیر لوله های انتقال سیال و مخازن تحت فشار که دارای ماهیت فشاری بر روی سطح خود هستند، وجود تنش اولیه می تواند حد تنش مجاز را افزایش دهد اما تنش پسماند به خصوص در ورق های مورد استفاده در صنایع خودرو که موضوع این پژوهش است به شدت مضر می باشد از این رو لازم است تنش پسماند در این ورق ها اندازه گیری و سپس با روش های موجود نسبت به کاهش آن اقدام گردد.

در طول سال های گذشته روش های مختلفی برای اندازه گیری تنش پسماند در سازه ها ارائه شده است. اندازه گیری تنش پسماند به روش های مخرب، نیمه مخرب و غیرمخرب تقسیم می شود. روش امواج هدایت شده فراصوتی، روش های پراش (پرتو ایکس و نوترون) و روش مغناطیسی از روش های غیرمخرب اندازه گیری تنش پسماند

امروزه استفاده از ورق های نازک در صنایع خودرو به علت وزن پایین، برای کاهش هزینه تولید و مصرف سوخت بسیار متداول است. ورق های مورد استفاده در این صنعت تحت جوشکاری و شکل دهی قرار می گیرند. حرارت ناشی از عملیات جوشکاری می تواند باعث ایجاد انبساط های موضعی شود. هنگام سرد شدن قطعه میزان انقباض و کاهش دمای برخی از نواحی بیشتر از نواحی دیگر خواهد بود و این امر منجر به باقی ماندن تنش درون قطعه می شود. تقریباً هیچ قطعه یا سازه ای وجود ندارد که عاری از تنش پسماند باشد. تنش پسماند تأثیر قابل توجهی در طول عمر ورق دارد و در مواردی باعث اعوجاج، کاهش عمر خستگی، ایجاد و گسترش ترک می شود و در نهایت به شکست ترد می انجامد [۱]. البته در مواردی نیز وجود تنش پسماند در قطعه

فراصوت در زمینه اندازه‌گیری تنش پسماند جوشی به شخصی به نام سالامانکا [۹] باز می‌گردد. وی در سال ۱۹۹۰ از امواج طولی با زاویه شکست بحرانی برای اندازه‌گیری تنش پسماند ناشی از جوشکاری در فولاد سری ۶۰ استفاده کرد. با تغییر فرکانس تحریک موج، توانست تنش پسماند را در اعماق متفاوتی زیر سطح ورق اندازه‌گیری کند، همچنین نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنش پسماند با امواج فراصوت را با نتایج حاصل از اندازه‌گیری با روش کرنش سنجی سوراخ مقایسه کرد که تطابق قابل قبولی به دست آمد. این کار توانایی روش فراصوت در اندازه‌گیری تنش پسماند در عمق قطعه را برجسته‌تر کرد. صفی‌خانلو و همکارانش [۱۰] در یک مطالعه رفتار امواج طولی بحرانی و امواج لمب را با تغییرات تنش در یک نمونه آلومینیومی بررسی کردند و یک روش ساده و تجربی برای محاسبه ضریب آکوستوالاستیک ارائه دادند که در آن نیازی به محاسبه ثابت‌های مرتبه دوم (لامه) و مرتبه سوم (مورناگان) نبوده و با کالیبره کردن تغییرات تنش برحسب تغییرات زمان پرواز موج، ضریب آکوستوالاستیک به دست می‌آید. همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند که تغییرات زمان پرواز موج با تغییرات تنش در موج لمب خیلی شدیدتر از موج طولی بحرانی است. در سال اخیر موهابو [۱۱] در رساله دکتری به صورت جامع به بررسی انتشار موج لمب در ورق‌های تحت تنش پرداخت. وی اذعان داشت که برای فلزات معمولاً به ازای هر یک مگاپاسکال تنش اعمالی و یا پسماند سرعت به اندازه $10 \frac{\mu m}{s}$ تغییر می‌کند. همچنین مدل‌های هایپرالاستیک مورناگان و مونی-ریولین^۲ را برای شبیه‌سازی و مطالعه امواج الاستیک با دامنه محدود پیشنهاد داد.

در پژوهش حاضر با استفاده از شبیه‌سازی دو بعدی ورق نازک فولادی، برپایه روش اجزاء محدود، تاثیر تنش پسماند فشاری و کششی موضعی بر امواج لمب نامتقارن عبوری از این ورق بررسی خواهد شد. منظور از ورق نازک در این پژوهش، ورق‌های مورد استفاده در صنایع خودرو با ضخامت عموماً کمتر از دو میلیمتر است. با توجه به این که دقت این روش و حساسیت به مقدار تنش تابع فرکانس بازرسی بوده، این بررسی در فرکانس‌های مختلف انجام خواهد شد. تنش پسماند یکبار در جهت موازی با راستای انتشار موج (معادل تنش عرضی جوش) و بار دیگر در جهت

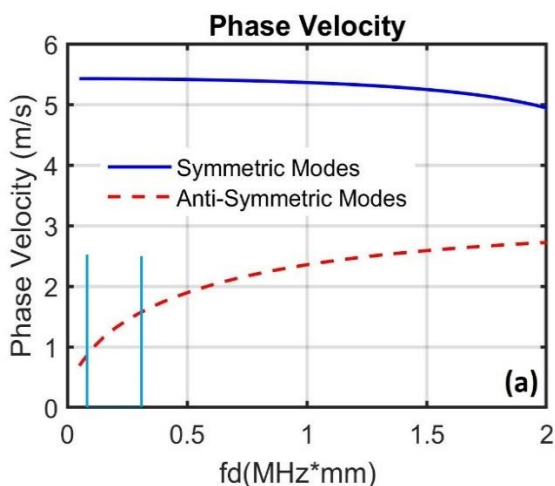
هستند که روش مغناطیسی تنها بر روی مواد فرومغناطیس قابل اجرا است و روش پراش نوترن^۱ تنها در آزمایشگاه قابل اجراست و همچنین روش پراش پرتو ایکس فقط برای قطعات کوچک در سیستم‌های آزمایشگاهی کاربرد دارد [۲]. در دهه‌های اخیر، امواج هدایت‌شده فراصوتی به علت سرعت زیاد بازرسی، هزینه کم (در مقایسه با دیگر روش‌های غیرمخرب)، قابل حمل بودن، حساسیت بالا به تغییرات ریزساختاری مواد و امکان بازرسی محدوده زیاد و حتی غیرقابل دسترسی در قطعات، به روش پرکاربردی بدل گشته است و پژوهشگران متعددی از این روش در مطالعات خود استفاده کرده و آن را گسترش داده‌اند [۳]. تکنیک اندازه‌گیری تنش پسماند با روش امواج فراصوت بر پایه خاصیت آکوستوالاستیک ماده استوار است، طبق این خاصیت، سرعت انتشار موج فراصوت در ماده به تنش موجود در آن بستگی دارد [۴]. سرعت موج فراصوت در یک ماده ایزوتروپیک در تمام جهات یکسان است، به عبارت دیگر فقط دو نوع سرعت موج داریم، سرعت موج طولی و سرعت موج عرضی. اما اگر همین ماده تحت تنش تک محوره قرار گیرد، ۵ حالت متفاوت برای تغییر سرعت امواج طولی و عرضی به عنوان تابعی از کرنش الاستیک به وجود می‌آید.

از اولین کسانی که به طور جدی به دسته‌بندی موضوع تنش پسماند و امواج فراصوت اهتمام ورزیدند و فرمول‌هایی مدون و قابل استفاده ارائه کردند، هیوس و کلی [۵] را می‌توان نام برد. این دو محقق تئوری انتشار امواج را در اجسام دارای تنش توسعه دادند. اساس کار آن‌ها برپایه تئوری الاستیسیته غیرخطی مورناگان [۶] یا همان تئوری الاستیسیته محدود استوار بود. آن‌ها با در نظر گرفتن معادلات به دست آمده در تئوری مورناگان و با استفاده از ثابت‌های الاستیک مرتبه سوم (l, n, m) علاوه بر ثابت‌های مرتبه دوم (λ, μ)، مسأله تنش را فرمول‌بندی کردند. همچنین سوو و همکارش [۷] با مقایسه‌ای بین فوتوالاستیسیته و آکوستوالاستیسیته در تحلیل تنش، استفاده از امواج فراصوت را بسیار دقیق‌تر و برتر از دیگر روش‌ها دانستند. ایگل و بری [۸] با آزمایش‌های متعدد و با صرف‌نظر از اثرات دما توانستند تنش‌های موجود در یک ریل فولادی را تعیین کنند. نخستین استفاده از روش

^۲Mooney-Rivlin

^۱Neutron Diffraction

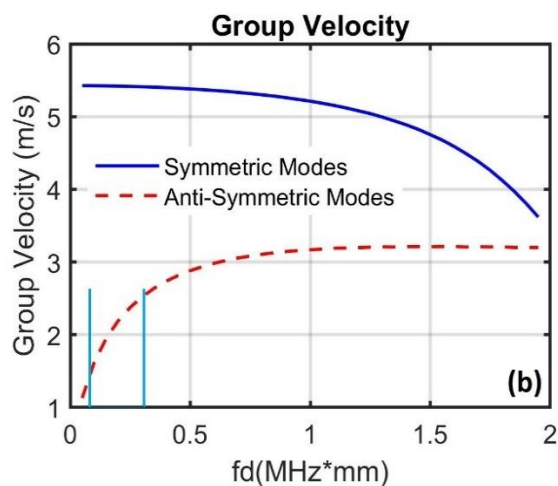
خاصیت سرعت انتشار امواج به فرکانس وابسته است. این خاصیت منجر به تشکیل دسته منحنی‌های پاشندگی سرعت فاز و گروه می‌شود. از منحنی پاشندگی می‌توان فرکانس تحریک مناسب را به منظور تحریک مد مناسب و جلوگیری از پیچیدگی سیگنال دریافتی از حسگر انتخاب کرد. در شکل منحنی‌های پاشندگی مربوط به ورق فولادی مورد استفاده در این پژوهش بر حسب سرعت گروه و سرعت فاز در فرکانس-ضخامت نشان داده شده است. بازه فرکانسی مورد بررسی در دو منحنی توسط خطوط عمودی موازی مشخص شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، در فرکانس‌های کمتر از ۵۰ کیلوهرتز، مد A_0 به شده پاشنده بوده و لذا مقادیر کمتر از این فرکانس بررسی نمی‌گردند.



عمود بر راستای انتشار موج (معادل تنش در جهت ضخامت جوش) در ورق ایجاد خواهد شد و نتایج هر کدام به صورت جداگانه بررسی خواهد شد.

۲- امواج هدایت‌شده فراصوتی

امواج لمب عضوی از خانواده امواج هدایت‌شده هستند که برای انتشار نیاز به دو مرز آزاد دارند. این امواج از مسیر مرزها پیروی می‌کنند و می‌توانند در فواصل طولانی و با حداقل میرایی انتشار یابند. لازم به ذکر است که حداکثر ضخامت ورق برای اینکه موج منتشر شده در آن یک موج لمب باشد، سه برابر طول موج منتشر شده است. دو نوع متداول امواج لمب، مد متقارن^۱ (S_i) و مد نامتقارن^۲ (A_i) هستند. از ویژگی‌های مهم امواج لمب به خاصیت پاشندگی^۳ آن‌ها می‌توان اشاره کرد [۱۲] که براساس این



شکل ۱- منحنی‌های پاشندگی ورق فولادی براساس (a) سرعت فاز و (b) سرعت گروه در فرکانس-ضخامت

به منظور بررسی اثر جهت تنش و مقدار آن، در این مسأله دو مقدار مثبت، یک مقدار صفر و دو مقدار منفی (مجموعاً ۵ مقدار) به ترتیب برای تنش کششی، حالت سالم و تنش فشاری در نظر گرفته شده است. این تنش یکبار در جهت عمود به جهت انتشار موج و بار دیگر در راستای انتشار موج اعمال خواهد شد. تأثیر فرکانس نیز مانند اثر فشار بررسی می‌گردد، لذا برای آن با توجه به بررسی نمودارهای پاشندگی ورق فولادی، ۶ مقدار در نظر گرفته خواهد شد. بنابراین در این بررسی ۷۰ حالت مختلف مورد شبیه‌سازی قرار خواهد گرفت.

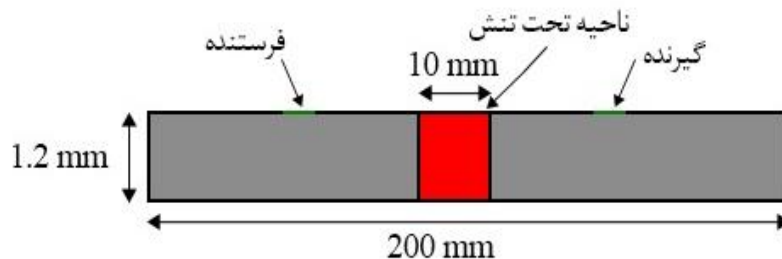
۳- تعریف مسأله

در این مسأله برای شبیه‌سازی از هندسه‌ای دو بعدی مطابق شکل ۱ استفاده شده است که طول ورق ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت آن ۱/۲ میلی‌متر است، همچنین یک فرستنده و یک حسگر نیز در دو طرف محل دارای تنش پسماند تعبیه شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است محل تنش در مرکز شکل بوده و طول ناحیه تحت تنش ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. فرستنده به فاصله ۴۰ میلی‌متر از مرکز ناحیه تحت تنش و در سمت چپ آن قرار گرفته و حسگر نیز به همین ترتیب در سمت راست قرار گرفته است.

³Dispersion Curves

¹Symmetric mode

²Antisymmetric mode



شکل ۱- طرحواره نمونه شبیه‌سازی شده

ثابت‌های آن برای این ورق در جدول ۲ ارائه شده است که در آن C10، C01 و D1 ضرایب مدل مونی-ریولین بوده و ρ و ν به ترتیب مدول الاستیسیته، چگالی و ضریب پواسون هستند.

جدول ۲- خواص فولاد و ضرایب مدل هایپرلاستیک مونی-ریولین [۱۴]

واحد	مقدار	پارامتر
GPa	۷۰/۲	C10
GPa	-۳۵/۲	C01
GPa	$1/1 \times 10^{-10}$	D1
GPa	۲۱۰	E
kg/m ³	۷۸۰۰	ρ
-	۰/۳	ν

این مسأله در دو گام زمانی حل شده است که در گام اول فشار اعمالی به سطح (به عنوان مدلی از تنش) در مدت زمان ۰/۱ ثانیه به صورت افزایشی به قسمت مرکزی ورق اعمال شده و در گام دوم موج لمب نامتقارن در ورق تولید و ارسال شده است. تحریک موج به صورت اعمال فشاری با دامنه ۱۰۵ پاسکال به محل فرستنده و با فرکانس‌های معرفی شده در جدول ۱ و به شکل تون-برست ۵ سیکل می‌باشد. همچنین شرایط مرزی ورق به صورت آزاد می‌باشد و هیچ قیدی به آن اعمال نشده است. اندازه فرستنده و گیرنده نصف طول موج ارسالی می‌باشد. در این مسأله به دلیل این که هدف بررسی حساسیت مد نامتقارن موج لمب می‌باشد لذا تحریک به نحوی اعمال شده که صرفاً مد نامتقارن ایجاد شود. این مسأله به صورت دو بعدی کرنش صفحه‌ای شبیه‌سازی و از آن جایی که نوع تحریک فرستنده به صورت اعمال فشار بوده و در محل حسگر فشار خوانده

مقادیر فشار اعمالی و فرکانس‌ها در این مطالعه، در جدول ۱ ارائه شده است. معیار انتخاب فرکانس در این مسأله، ضخامت بسیار کم ورق و جلوگیری از ایجاد مودهای بالاتر امواج نامتقارن است. بازه فرکانس انتخابی در شکل با خطوط آبی رنگ مشخص شده است.

جدول ۱- متغیرهای مسأله

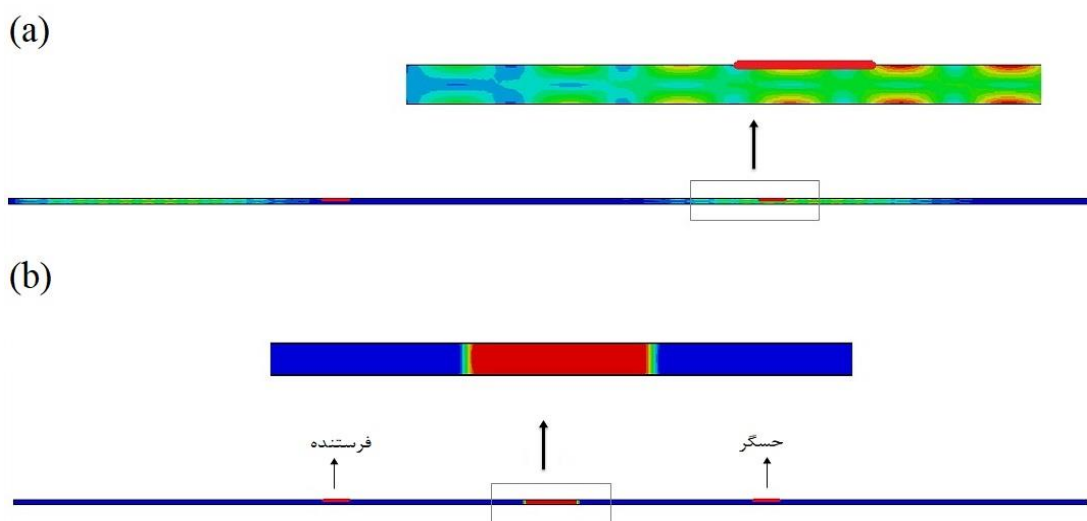
متغیر	مقدار
فشار اعمالی (MPa)	۰، ۵۰، ۱۱۰، ۵۰، -۵۰، -۱۱۰
فرکانس (kHz)	۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰

۴- شبیه‌سازی

در این پژوهش از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس برای شبیه‌سازی استفاده شده است. ورق مورد مطالعه به صورت دو بعدی با ابعاد ارائه شده در بخش تعریف مسأله ایجاد شده است. برای توصیف رفتار مادی ورق از مدل هایپرلاستیک مونی-ریولین استفاده می‌گردد زیرا مدل‌های خطی ماده اثر آکوستوالاستیسیته را از خود نشان نمی‌دهند. غیر خطی بودن مسأله، از غیرخطی بودن ماده و یا آثار غیرخطی تماسی به علت وجود آسیب‌های از نوع تماس، مثل ترک، ناشی می‌شود. برخی از مطالعات نشان داده‌اند که پدیده‌های غیرخطی به وجود ترک خستگی، تنش پسماند و لایه لایه شدگی بسیار حساس هستند و تأثیر بسیار کمی از تغییرات محیطی می‌پذیرند. طبق پژوهش پروئل و همکاران [۱۳]، غیرخطی بودن مسأله می‌تواند به علت تغییر شکل پلاستیک ورق تحت بارگذاری خستگی، افزایش یابد. به همین علت مطالعات اخیر نظیر یانگ [۳] و موهابت [۱۱] از مدل غیرخطی برای پژوهش خود استفاده کرده‌اند. با توجه به این که از میان شرایط ذکر شده، در این مسأله تنها امکان غیرخطی بودن ماده وجود دارد، لذا از مدل غیرخطی مونی-ریولین استفاده خواهد شد که

می‌شود لذا مشکلاتی نظیر تداخل امواج و پیچیدگی تفسیر نتایج به‌وجود نمی‌آید. در شکل ۳ انتشار موج با فرکانس ۱۵۰ کیلوهرتز در ورق بدون تنش و ورق تحت تنش فشاری عمودی ۱۱۰ مگاپاسکال نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳- b مشخص است به علت وجود تنش پسماند زیاد در مرکز ورق، تنش‌های ناشی از انتشار موج قابل مشاهده نمی‌باشد. فرستنده و گیرنده موج نیز در شکل مشاهده می‌شود.

می‌شود بنابراین از روش صریح^۱ برای حل مسأله موج استفاده می‌شود. فرکانس داده برداری 10^9 هرتز در نظر گرفته شده است و با توجه به رابطه عکس بین فرکانس و زمان، گام زمانی حل برابر با 10^{-9} ثانیه می‌باشد. المان مورد استفاده در مش‌بندی ورق المان کرنش صفحه‌ای (CPE4R) بوده و اندازه مش $0/3$ میلی‌متر انتخاب شد. در این شبیه‌سازی به دلیل این‌که از فرکانس‌های پایین استفاده شده و ضخامت ورق نیز کم می‌باشد، بنابراین طبق منحنی پاشندگی فقط دو مد بنیادی موج لمب تولید



شکل ۲- کانتور انتشار موج در (a) ورق بدون تنش و (b) ورق تحت تنش ۱۱۰ مگاپاسکال در فرکانس ۱۵۰ کیلوهرتز

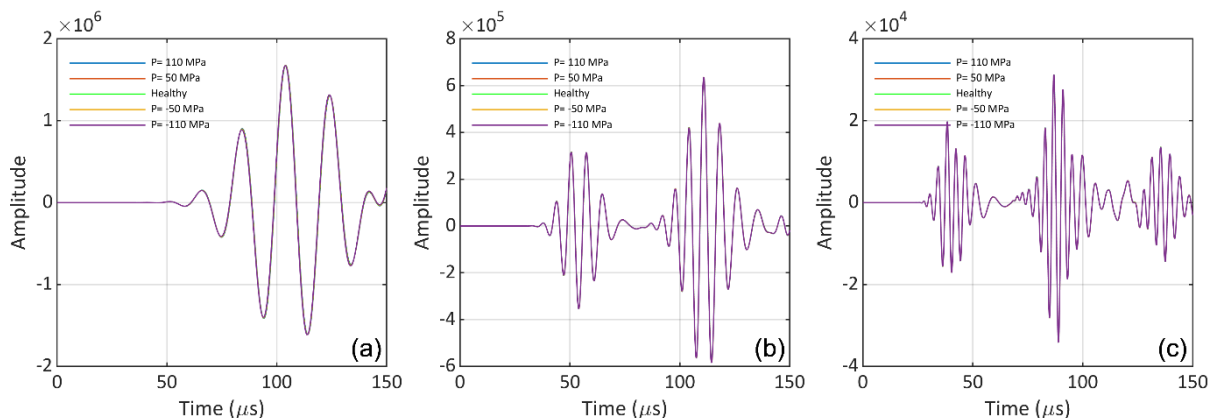
نمی‌شود. در هر یک از فرکانس‌ها رفتار اولین پژواک موج رسیده به حسگر، مورد بررسی واقع شده و تغییرات زمان رسیدن آن پژواک مطالعه شده است. شکل ۳ و شکل ۴ به ترتیب نمایانگر جزئیات سیگنال‌های دریافتی در حالت تنش افقی (تنش در راستای عمود بر جوش) و تنش عمودی (تنش در راستای ضخامت جوش) است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با تغییر نوع تنش از فشاری به کششی و مقدار آن، در حالت تنش افقی، موج در زمان زودتر به حسگر می‌رسد. این در حالیست که در چنین شرایطی برای حالت تنش عمودی (شکل ۴)، موج با سرعت کمتر و در زمان دیرتر به حسگر می‌رسد.

۵- نتایج

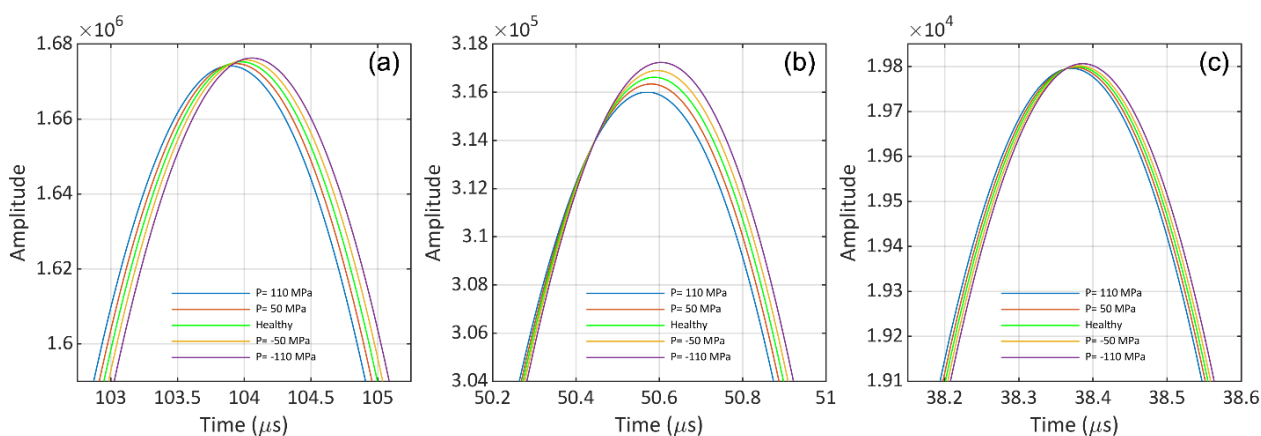
شبیه‌سازی‌ها برای هریک از ۷۰ حالت معرفی شده انجام گرفته است و نتایج آن در قالب سیگنال‌های فشار دریافتی در ناحیه حسگر استخراج شده است. این سیگنال‌ها فقط برای سه فرکانس ۵۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوهرتز در تنش‌های ۱۱۰، -۵۰، ۰، ۵۰ و ۱۱۰ مگاپاسکال برای حالت تنش افقی در شکل نشان داده شده است. البته نمایش کلی سیگنال‌ها برای حالت تنش عمودی نیز به همین صورت است، لذا فقط جزئیات آن برای این حالت از تنش نمایش داده خواهد شد.

نتایج مشابهی برای فرکانس‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ کیلوهرتز نیز بدست آمده است که به دلیل یکسان بودن روند استخراج نتیجه برای آن‌ها، سیگنال‌های آن نشان داده

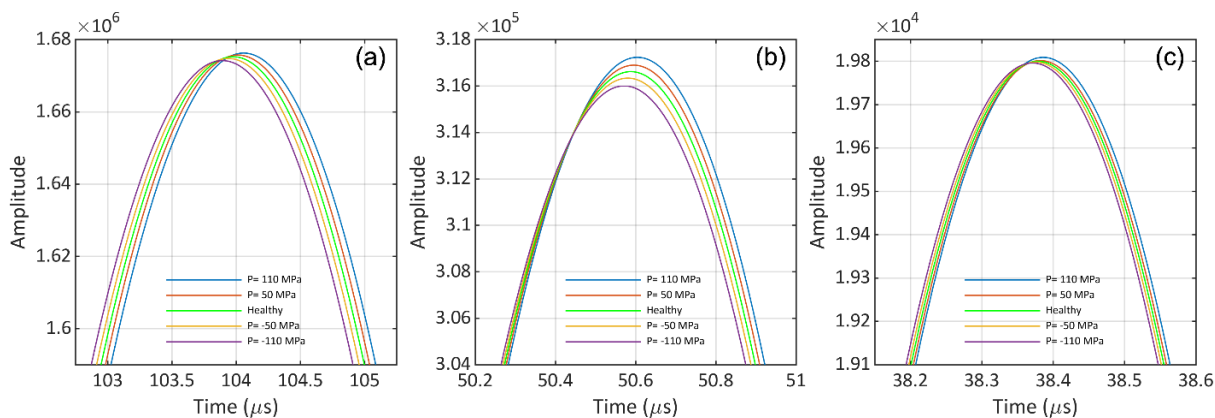
^۱Explicit



شکل ۴- سیگنال‌های خام دریافتی در حسگر در ۵ تنش مختلف برای فرکانس‌های (a) ۵۰، (b) ۱۵۰ و (c) ۳۰۰ کیلوهرتز



شکل ۳- تأثیر تنش پسماند افقی بر سیگنال‌های دریافتی در فرکانس‌های (a) ۵۰، (b) ۱۵۰ و (c) ۳۰۰ کیلوهرتز



شکل ۴- تأثیر مقدار تنش پسماند عمودی بر سیگنال‌های دریافتی در فرکانس‌های (a) ۵۰، (b) ۱۵۰ و (c) ۳۰۰ کیلوهرتز

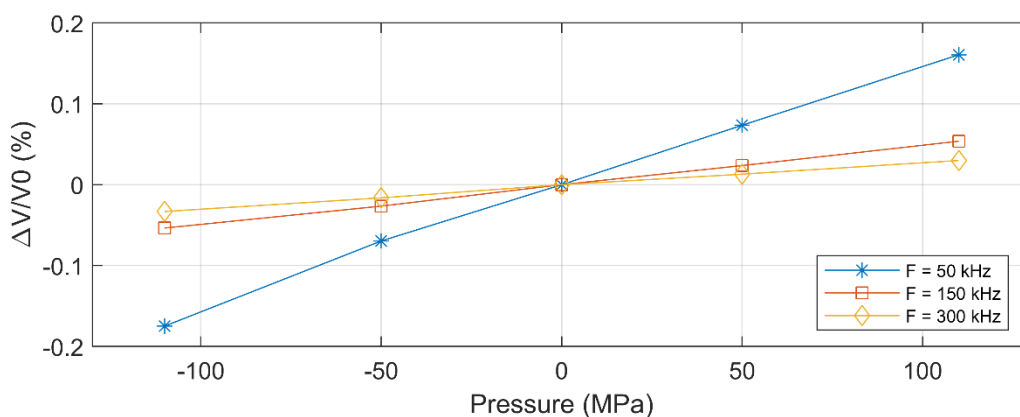
فرکانس، (پدیده پاشندگی- منحنی‌های شکل ۱) از درصد تغییر نسبی سرعت در هر فرکانس استفاده شده است. در هنگام اعمال تنش به ورق طول آن به اندازه ۱ تا ۵ میکرومتر (بر حسب مقدار تنش) تغییر می‌یابد که در محاسبه سرعت لحاظ شده است. شکل‌های ۷ و ۸ درصد تغییرات نسبی سرعت با مقدار و نوع تنش را در فرکانس‌های ۵۰، ۱۵۰ و

پس از این‌که روند مشخصی در زمان رسیدن موج به حسگر بر اساس مقدار و نوع تنش مشاهده شد با استفاده از رابطه سرعت موج با زمان مشخص می‌شود که سرعت موج نیز دست‌خوش تغییر می‌گردد. بنابراین سرعت موج به عنوان شاخصی برای اندازه‌گیری تنش پسماند در نظر گرفته می‌شود. البته با توجه به متغیر بودن سرعت موج بر حسب

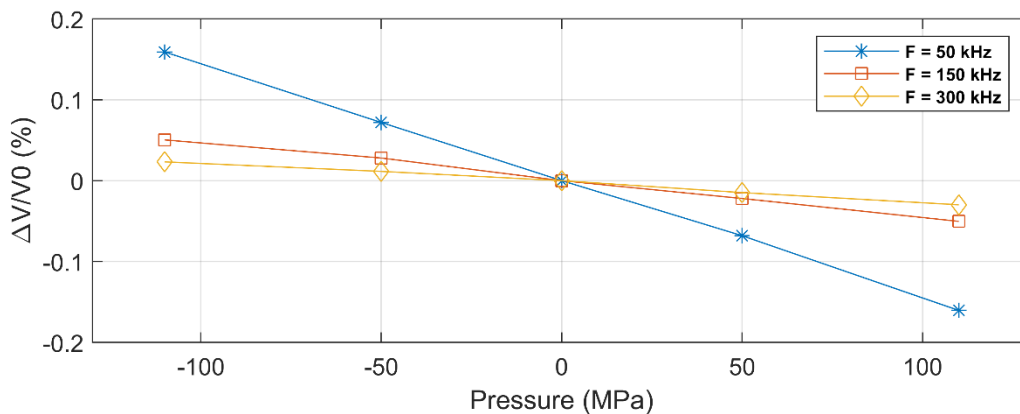
منحنی سرعت فاز و گروه در فرکانس های پایین بیشتر است و هر عاملی که بر سرعت تاثیرگذار باشد، در فرکانس های پایین خود را بیشتر نشان خواهد داد. بنابراین می توان نتیجه گرفت فرکانس های پایین تر حساسیت بالایی به تنش پسماند دارند و هرچه فرکانس بزرگ تر شود تغییرات سرعت نامحسوس شده تا جایی که حساسیتی به تنش نشان نمی دهد. با بررسی مقادیر شیب که در جدول ۳ ارائه شده است، کاشف به عمل می آید که با افزایش فرکانس شیب نمودار سرعت-تنش کمتر می شود و این بدین معنی است که هر چه فرکانس موج تحریک شده بیشتر شده است مقدار تغییرات سرعت نسبت به تنش کمتر شده است، لذا از میان فرکانس های مورد بررسی در این مسأله، فرکانس ۵۰ کیلوهرتز تغییرات سرعت را نسبت به تغییرات تنش پسماند بهتر نشان می دهد. بنابراین این فرکانس مناسب ترین فرکانس برای ارزیابی ورق فولادی نازک، از حیث میزان تنش پسماند افقی و عمودی می باشد.

۳۰۰ کیلوهرتز نشان می دهند. البته بیان این نکته لازم است که با تغییر تنش پسماند دامنه امواج دریافتی نیز با روند مشخصی دچار تغییر می شوند، اما به این دلیل که استفاده از داده های سرعت نسبت به داده های دامنه اطمینان بیشتری دارد، اثر تنش بر دامنه این امواج بررسی نخواهد شد.

شکل ۵ نشان می دهد که وقتی تنش پسماند در جهت انتشار موج (تنش افقی) است با تغییر تنش از حالت فشاری به کششی سرعت افزایش می یابد اما طبق آنچه شکل ۶ نشان می دهد برای تنش پسماند عمود بر جهت انتشار موج (تنش عمودی) عکس این مطلب صادق است. همچنین شکل های ۷ و ۸ نشان می دهند که رابطه سرعت با تنش خطی است اما شیب آن با توجه به فرکانس متغیر می باشد. مقادیر شیب سرعت برای فرکانس های مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. همانطور که مشخص است با افزایش فرکانس شیب نمودار کاهش می یابد. این امر می تواند به این دلیل باشد که در منحنی پاشندگی مود A_0 ، شیب



شکل ۵- درصد تغییرات نسبی سرعت با تنش پسماند افقی در فرکانس های ۵۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوهرتز



شکل ۶- درصد تغییرات نسبی سرعت با تنش پسماند عمودی در فرکانس های ۵۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوهرتز

جدول ۳- شیب تغییرات سرعت نسبت به تغییرات تنش پسماند در فرکانس‌های مختلف

شیب در تنش پسماند عمودی ($10^{-6} \text{ m}^3/\text{N.s}$)	شیب در تنش پسماند افقی ($10^{-6} \text{ m}^3/\text{N.s}$)	فرکانس (kHz)
- ۰/۰۲۱	+ ۰/۰۲۳	۵۰
- ۰/۰۱۲	+ ۰/۰۱۳	۱۰۰
- ۰/۰۰۹	+ ۰/۰۱۲	۱۵۰
- ۰/۰۰۸	+ ۰/۰۰۹	۲۰۰
- ۰/۰۰۷	+ ۰/۰۰۷	۲۵۰
- ۰/۰۰۶	+ ۰/۰۰۷	۳۰۰

۶- نتیجه‌گیری

در چند سال اخیر استفاده از ورق‌های نازک به علت کاهش وزن و افزایش بهره‌وری انرژی، در صنعت خودرو سازی افزایش یافته است. این ورق‌ها در فرآیند استفاده با عملیات شکل‌دهی و جوشکاری مواجه هستند که سبب بروز تنش پسماند در این ورق‌ها می‌گردد. این تنش در دراز مدت اثراتی منفی از جمله کاهش عمر خستگی و بروز و رشد سریعتر ترک بر ورق‌ها می‌گذارد. برای بررسی وجود این تنش در ورق‌ها روش‌های مخرب و غیرمخرب متعددی وجود دارد که استفاده از امواج هدایت‌شده فراصوتی لمب، به دلیل مزیت‌های بسیاری که بر سایر روش‌ها دارد، مورد توجه قرار گرفته است. لذا در این پژوهش به بررسی اثر تنش پسماند موضعی در ورق نازک بر روی رفتار امواج فراصوتی لمب پرداخته شد. برای این منظور یک ورق نازک شبیه‌سازی شد و تحت تنش‌های عمودی و افقی قرار گرفت. مد نامتقارن A_0 موج لمب در فرکانس‌های مختلف تحریک شد و موج دریافتی در حسگر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پس از بررسی سیگنال‌های دریافتی در حسگر تغییرات سرعت به عنوان شاخصی برای ارزیابی میزان تنش پسماند معرفی گردید. با در نظرگیری تغییر طول در ورق تحت تنش، سرعت عبور موج محاسبه شده و تغییرات آن بر حسب تنش پسماند در فرکانس‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوهرتز بررسی شد. از بررسی این نمودارها این نتیجه حاصل گردید که برای ارزیابی تنش پسماند عمودی و افقی در ورق فولادی با ضخامت ۱/۲ میلی‌متر، استفاده از مد A_0 موج لمب در فرکانس ۵۰ کیلوهرتز، نسبت به سایر فرکانس‌ها حساسیت بیشتری را دارا می‌باشد.

۷- منابع

- [1] Sattari-Far, I.a. and M. Farahani, Effect of the weld groove shape and pass number on residual stresses in butt-welded pipes. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2009..
- [۲] معماریان، ح؛ خدمتی، م؛ مطالعه و بررسی روش‌های تعیین تنش پسماند در ورق‌های جوشکاری شده، یازدهمین همایش ملی صنایع دریایی ایران. ۱۳۸۸.
- [3] Yang, Y., Damage Detection Using Second Harmonic Generation of Low-Frequency Guided Waves, in School of Civil, Environmental and Mining Engineering, 2019: University of Adelaide.
- [4] Javadi, Y., M. Akhlaghi, and M.A. Najafabadi, Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding longitudinal residual stress through the thickness in austenitic stainless steel plates. Materials & Design, 2013.
- [5] Hughes, D.S. and J. Kelly, Second-order elastic deformation of solids. Physical review, 1953.
- [6] Murnaghan, F.D., Finite deformation of an elastic solid. 1951: Wiley.
- [7] Su, Z. and L. Ye, Identification of damage using Lamb waves: from fundamentals to applications. 2009: Springer Science & Business Media.
- [8] Egle, D. and D. Bray, Measurement of acoustoelastic and third- order elastic constants for rail steel. The journal of the Acoustical Society of America, 1976.
- [9] Leon-Salamanca, T., Ultrasonic measurement of residual stress in steels using critically refracted longitudinal waves(LCR).1988:TexasA&M University.
- [۱۰] صفی‌خانلو، ح؛ علی‌میرزایی، س؛ احمدی نجف‌آبادی، م؛ بررسی رفتار امواج طولی بحرانی و امواج لمب با تغییرات تنش در نمونه Al 1050. مهندسی مکانیک مدرس، ۲۰۲۰.
- [11] Mohabuth, M.A., Investigation of Lamb Wave Propagation in Pre-stressed Plates with Applications to Structural Health Monitoring, in School of Mechanical Engineering. 2018: University of Adelaide.
- [12] Rose, J.L., Ultrasonic guided waves in solid media. 2014: Cambridge university press.
- [13] Pruell, C., et al., A nonlinear-guided wave technique for evaluating plasticity-driven material damage in a metal plate. NDT & E International, 2009.
- [14] Chen, B.-Q., M. Hashemzadeh, and C.G. Soares, Numerical and experimental studies on temperature and distortion patterns in butt-welded plates. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014.