

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱.....	فصل اول: مقدمه.....
۲.....	۱-۱- مقدمه.....
۳.....	۲-۱- اهداف رساله.....
۴.....	۳-۱- نوآوری‌ها.....
۴.....	۳-۱- ساختار رساله.....
۶.....	فصل دوم: بررسی اصول و مبانی موج لمب و مرور ادبیات.....
۷.....	۱-۲- مقدمه.....
۷.....	۲-۲- موج لمب.....
۱۰.....	۳-۲- پاشندگی.....
۱۳.....	۴-۲- مزایا و محدودیت‌های موج لمب.....
۱۴.....	۵-۲- روش‌های ارسال و دریافت موج لمب.....
۱۴.....	۱-۵-۲- کاوند فراصوتی.....
۱۴.....	۲-۵-۲- المانهای پیزوالکتریک.....
۱۴.....	۳-۵-۲- فراصوت لیزری.....
۱۵.....	۴-۵-۲- تراگذارهای بین‌انگشتی.....
۱۵.....	۵-۵-۲- حسگرهای فیبر نوری.....
۱۶.....	۶-۲- کاربردهای امواج لمب.....
۱۶.....	۱-۶-۲- بازرسی خطوط لوله.....
۱۶.....	۲-۶-۲- پایش سلامت سازه.....
۱۶.....	۳-۶-۲- تعیین ثابت‌های الاستیک.....
۱۷.....	۴-۶-۲- بازرسی قطعات کامپوزیتی.....
۱۷.....	۵-۶-۲- استفاده در حسگرها.....
۱۷.....	۷-۲- انتشار موج لمب.....

۱۹	۸-۲- تأثیر عیب بر روی سیگنال.....
۲۰	۹-۲- خوشه مدهای مرتبه بالا.....
۲۲	۲-۹-۱- سرعت موج HOMC.....
۲۳	۲-۱۰- مروری بر تحقیقات پیشین موج لمب.....
۲۶	۲-۱۱- مروری بر تحقیقات پیشین موج HOMC.....
۲۸	۲-۱۲- جمع بندی.....
۳۰	فصل سوم: آزمایش های تجربی.....
۳۱	۳-۱- مقدمه.....
۳۱	۳-۲- تحریک موج HOMC در ورق.....
۳۱	۳-۳- تجهیزات آزمایشگاهی.....
۳۱	۳-۳-۱- دستگاه فرستنده/گیرنده.....
۳۲	۳-۳-۲- تراگذار فراصوتی.....
۳۴	۳-۳-۳- کابل.....
۳۴	۳-۳-۴- کارت مبدل آنالوگ به دیجیتال.....
۳۴	۳-۳-۵- واحد پردازنده.....
۳۴	۳-۴- نمونه های آزمایش.....
۳۷	۳-۵- تعیین زاویه ی ارسال موج HOMC.....
۳۹	۳-۶- تحریک موج لمب با استفاده از کفشک مخروطی ناقص.....
۴۱	۳-۶-۱- طراحی کفشک.....
۴۴	۳-۷- تحریک موج لمب با استفاده از کفشک زاویه ای.....
۴۵	۳-۸- جمع بندی.....
۴۶	فصل چهارم: شبیه سازی عددی.....
۴۷	۴-۱- مقدمه.....
۴۷	۴-۲- شبیه سازی اجزای محدود موج لمب.....
۴۸	۴-۲-۱- تعیین گام زمانی.....
۵۰	۴-۲-۲- تحریک موج لمب.....

۵۱	.....۴-۲-۳- تعیین اندازه‌ی المان
۵۱	.....۴-۳- شبیه‌سازی انتشار موج HOMC
۵۳	.....۴-۴- شبیه‌سازی انتشار موج لمب با استفاده از کفشک مخروطی ناقص و کفشک زاویه‌ای
۵۴	.....۴-۵- جمع‌بندی
۵۵	..... فصل پنجم: بررسی و تحلیل نتایج
۵۶	.....۱-۵- مقدمه
۵۶	.....۲-۵- تأثیر فرکانس بر موج HOMC
۵۶	.....۱-۲-۵- بررسی تأثیر فرکانس بر موج HOMC با استفاده از شبیه‌سازی عددی
۶۲	.....۲-۲-۵- بررسی تأثیر فرکانس بر موج HOMC به روش تجربی
۶۴	.....۳-۵- حساسیت موج HOMC نسبت به عیب
۶۵	.....۱-۳-۵- بررسی حساسیت موج HOMC نسبت به عیب با استفاده از شبیه‌سازی عددی
۶۷	.....۲-۳-۵- بررسی حساسیت موج HOMC نسبت به عیب به روش تجربی
۶۸	.....۳-۳-۵- مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی عددی و تجربی
۷۰	.....۴-۵- مقایسه‌ی تحریک موج لمب با کفشک مخروطی ناقص و کفشک زاویه‌ای
۷۴	.....۵-۵- جمع‌بندی
۷۵	..... فصل ششم: نتیجه‌گیری
۷۶	.....۱-۶- مقدمه
۷۶	.....۲-۶- نتایج
۷۷	.....۳-۶- پیشنهادها
۷۸	..... مراجع

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲- زاویه‌ی تحریک و سرعت گروه مدهای مختلف در ورق آلومینیومی در 18 MHz.mm [۳]	۲۲
جدول ۲-۲- برخی از پژوهش‌های پیشین در زمینه‌ی شناسایی عیوب با استفاده از موج لمب.....	۲۵
جدول ۱-۳- سرعت فاز، زاویه‌ی تحریک و سرعت گروه مدهای موج لمب در ورق فولادی در 20 MHz-mm	۳۹
جدول ۲-۳- مشخصات فیزیکی و آکوستیکی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۱۴ [۶۶].....	۴۲
جدول ۱-۴- پارامترهای شبیه‌سازی انتشار موج HOMC.....	۵۲
جدول ۲-۴- پارامترهای شبیه‌سازی انتشار موج لمب با استفاده از کفشک مخروطی ناقص و کفشک زاویه‌ای.....	۵۴
جدول ۱-۵- مدهای تحریک‌شده و مد غالب در موج HOMC در فرکانس-ضخامت‌های مختلف.....	۶۱

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۲-۱- (الف) مد متقارن موج لمب، (ب) مد نامتقارن موج لمب [۴].....	۹
شکل ۲-۲- شبیه‌سازی انتشار مد S ₀ در ورق آلومینیومی با ضخامت 1 mm و در فرکانس 2 MHz: (الف) در نزدیکی فرستنده، (ب) در فاصله‌ی 50 mm از فرستنده، (ج) در فاصله‌ی 100 mm از فرستنده [۷] ۱۱	۱۱
شکل ۲-۳- منحنی پاشندگی موج لمب در ورق آلومینیومی [۵].....	۱۱
شکل ۲-۴- سیستم مختصات در ورق و مؤلفه‌های جابه‌جایی موج لمب [۲۲].....	۱۷
شکل ۲-۵- طرح‌واره‌ی عبور و بازتاب موج در برخورد با عیب [۲۵].....	۲۰
شکل ۲-۶- منحنی پاشندگی ورق آلومینیومی: (الف) منحنی سرعت فاز، (ب) منحنی سرعت گروه، (ج) زاویه تحریک مدها با استفاده از کفشک پرسپیکس [۳].....	۲۱
شکل ۳-۱- دستگاه فرستنده/گیرنده فراصوتی الف (USB-UT350 ب) Panametrics 5070PR.....	۳۲
شکل ۳-۲- کاوند زاویه متغیر 2 MHz.....	۳۳
شکل ۳-۳- طیف فرکانسی کاوند زاویه متغیر 2 MHz.....	۳۳
شکل ۳-۴- طرح‌واره‌ی فرایند واسنجی کاوند با استفاده از بلوک V1 الف) بررسی محل خروج موج ب) بررسی زاویه موج.....	۳۳
شکل ۳-۶- سیگنال حاصل از ارسال الف) موج طولی ب) موج عرضی در ورق فولادی.....	۳۶
شکل ۳-۷- آزمایش تحریک موج HOMC در ورق.....	۳۶
شکل ۳-۸- طرح‌واره‌ی تحریک موج لمب با استفاده از کاوند زاویه‌ای [۶۳].....	۳۸
شکل ۳-۹- منحنی پاشندگی ورق فولادی الف) سرعت فاز ب) سرعت گروه.....	۳۸
شکل ۳-۱۰- تولید موج لمب با کفشک مخروطی ناقص [۶۵].....	۴۰
شکل ۳-۱۱- منحنی پاشندگی ورق آلومینیومی ۲۰۱۴ الف) سرعت فاز ب) سرعت گروه.....	۴۲
شکل ۳-۱۲- کاوند نرمال 2.25 MHz.....	۴۳
شکل ۳-۱۳- کفشک مخروطی ناقص از جنس پلکسی‌گلاس.....	۴۳
شکل ۳-۱۴- تحریک مد S ₀ با استفاده از کفشک مخروطی ناقص در فرکانس 2.25 MHz.....	۴۴
شکل ۳-۱۵- تحریک مد S ₀ با استفاده از کفشک زاویه‌ای در فرکانس 2.25 MHz.....	۴۴
شکل ۴-۱- نمایش ΔL در الف) المان مثلثی مرتبه دو، ب) المان مثلثی خطی، ج) المان مربعی خطی [۶۷].....	۴۹
شکل ۴-۲- روش‌های مختلف تحریک برای ایجاد موج لمب در ورق: الف) تحریک در راستای عمود بر لبه‌ی ورق، ب) تحریک در راستای لبه‌ی ورق، ج) تحریک از بالا [۲۲].....	۵۰

شکل ۴-۳- مدل اجزای محدود انتشار موج لمب در ورق [۲۲]..... ۵۱

شکل ۴-۴- طرح‌واره‌ی مدل دوبعدی مورد استفاده در شبیه‌سازی اجزای محدود ۵۳

شکل ۴-۵- پالس تک فرکانس کوتاه دارای ۵ سیکل و فرکانس مرکزی 2 MHz ۵۳

شکل ۵-۱- موقعیت مکانی گره‌های استفاده شده در روش 2D FFT در شبیه‌سازی عددی ۵۷

شکل ۵-۲- نمایش مدهای تحریک‌شده در موج HOMC در طیف عدد موج- فرکانس حاصل از تحلیل 2D FFT در فرکانس: الف) 1.75 MHz (معادل 17.5 MHz-mm)، ب) 2 MHz (معادل 20 MHz-mm)، ج) 2.25 MHz (معادل 22.5 MHz-mm)، د) 3.5 MHz (معادل 35 MHz-mm) ۵۸

شکل ۵-۳- دامنه‌ی بی‌بعدشده مدهای تحریک‌شده در موج HOMC در فرکانس: الف) 1.75 MHz (معادل 17.5 MHz-mm)، ب) 2 MHz (معادل 20 MHz-mm)، ج) 2.25 MHz (معادل 22.5 MHz-mm)، د) 3.5 MHz (معادل 35 MHz-mm) ۵۹

شکل ۵-۴- کانتور اندازه‌ی جابه‌جایی در سطح مقطع ورق در گام زمانی $110 \mu s$ در فاصله‌ی تقریبی 390 mm از لبه‌ی سمت چپ ورق در فرکانس-ضخامت: الف) 15 MHz-mm، ب) 17.5 MHz-mm، ج) 20 MHz-mm، د) 22.5 MHz-mm، ه) 25 MHz-mm، و) 27.5 MHz-mm، ز) 30 MHz-mm، ح) 32.5 MHz-mm، ط) 35 MHz-mm ۶۰

شکل ۵-۵- پروفیل جابه‌جایی موج HOMC در فرکانس-ضخامت: الف) 17.5 MHz-mm، ب) 20 MHz-mm و 22.5 MHz-mm ۶۲

شکل ۵-۶- نمایشی از آزمایش تحریک موج HOMC در ورق با استفاده از دستگاه USB-UT350 ۶۳

شکل ۵-۷- برخورد موج HOMC با ترک سطحی به عمق: الف) 5% در 17.5 MHz-mm، ب) 50% در 17.5 MHz-mm، ج) 5% در 20 MHz-mm، د) 50% در 20 MHz-mm، ه) 5% در 22.5 MHz-mm، و) 50% در 22.5 MHz-mm ۶۴

شکل ۵-۸- توزیع تنش عمودی موج HOMC در راستای ضخامت ورق در فاصله‌ی 110 mm از تراگذار در فرکانس-ضخامت: الف) 15 MHz-mm، ب) 17.5 MHz-mm، ج) 20 MHz-mm، د) 22.5 MHz-mm، ه) 25 MHz-mm، و) 30 MHz-mm، ز) 32.5 MHz-mm، ح) 35 MHz-mm ۶۶

شکل ۵-۹- طرح‌واره‌ی شبیه‌سازی دوبعدی انتشار موج HOMC در بررسی حساسیت موج به ترک سطحی ۶۷

شکل ۵-۱۰- کانتور جابه‌جایی موج HOMC در برخورد با ترک سطحی در 50% در فرکانس-ضخامت 20 MHz-mm در گام زمانی: الف) $56 \mu s$ ، ب) $68 \mu s$ و ج) $111 \mu s$ ۶۸

شکل ۵-۱۱- مقایسه‌ی سیگنال شبیه‌سازی برخورد موج HOMC با ترک سطحی 50% در فرکانس-ضخامت‌های: الف) 17.5 MHz-mm، ب) 20 MHz-mm و ج) 22.5 MHz-mm با سیگنال تجربی همان ترک سطحی در فرکانس-ضخامت‌های: د) 17.5 MHz-mm، ه) 20 MHz-mm و و) 22.5 MHz-mm ۶۹

- ۶۹.....
- شکل ۵-۱۲- تغییرات ضریب بازتاب عیب با عمق ترک سطحی و فرکانس-ضخامت تحریک؛ الف) شبیه‌سازی عددی و ب) آزمایش ۷۰
- شکل ۵-۱۳- طرح‌واره‌ی شبیه‌سازی تحریک موج لمب در ورق آلومینیومی با استفاده از الف) کفشک زاویه‌ای، ب) کفشک مخروطی ناقص ۷۱
- شکل ۵-۱۴- مقایسه‌ی طیف عدد موج- فرکانس حاصل از تحلیل 2D FFT در فرکانس 2.25 MHz با استفاده از: الف) کفشک زاویه‌ای، ب) کفشک مخروطی ناقص، مقایسه‌ی دامنه‌ی بی‌بعد شده‌ی مدهای A_0 و S_0 با استفاده از: ج) کفشک زاویه‌ای، د) کفشک مخروطی ناقص ۷۲
- شکل ۵-۱۵- سیگنال لبه‌ی ورق آلومینیومی با تحریک مد S_0 با استفاده از کفشک زاویه‌ای به روش الف) شبیه‌سازی عددی، ب) تجربی؛ با استفاده از کفشک مخروطی ناقص به روش ج) شبیه‌سازی عددی، د) تجربی ۷۳

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

پیشرفت و گسترش صنایع نیازمند تولید قطعات و تجهیزات متعددی است و وجود نقص و خرابی در هر یک از قطعات و تجهیزات می‌تواند مشکلات فراوانی را ایجاد کند. مثلاً خرابی قطعات هواپیما ممکن است منجر به سقوط هواپیما شود و خسارت‌های وارده از سقوط هواپیما جبران‌ناپذیر هستند. درحالی‌که با صرف هزینه‌های کم و بازرسی‌های منظم، می‌توان از این خسارات پیشگیری کرد.

آزمون غیرمخرب^۱ یکی از پرکاربردترین روش‌های کنترل کیفی برای تعیین نقص در قطعات مختلف و نیز ارزیابی کیفی محصولات است. با استفاده از آزمون غیرمخرب، می‌توان سلامت سازه و ویژگی‌های مواد آن را ارزیابی کرد. طبق تعریف کمیته‌ی بین‌المللی آزمون‌های غیرمخرب^۲، آزمون غیرمخرب عملیاتی است که در آن بازرسی و یا ارزیابی مواد و قطعات تأثیری بر کارایی نهایی آن‌ها نمی‌گذارد. با استفاده از آزمون‌های غیرمخرب می‌توان عیب‌های موجود در قطعات از جمله ترک، شکستگی داخلی و سطحی، تخلخل و حفره‌های داخلی و نیز هر گونه عیبی که در هنگام انجام کار در قطعه ایجاد می‌شود، را شناسایی کرد. به دلیل سرعت بالا و هزینه‌ی پایین، آزمون‌های غیرمخرب جایگاه ویژه‌ای در صنعت یافته‌اند.

آزمون فراصوتی^۳ یکی از انواع آزمون‌های غیرمخرب است که امروزه در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش قطعات با ارسال و دریافت امواج فراصوتی بازرسی می‌شوند. امواج فراصوتی امواج صوتی هستند که فرکانس آنها بالاتر از حد شنوایی انسان، یعنی ۲۰ کیلوهرتز، است. سوکولوف^۴ در سال ۱۹۲۹ برای اولین بار از امواج فراصوتی برای بازرسی مواد استفاده کرد [۱].

سازه‌های ورقی یا به‌طورکلی تر سازه‌ها و قطعات با اجزای نازک از کاربرد و اهمیت زیادی در صنایع مختلف مانند نفت، گاز، پتروشیمی، خودروسازی، هوافضا و ... برخوردارند. از این رو ارزیابی این قطعات اهمیت زیادی دارد. برای ارزیابی این قطعات از نوع خاصی از امواج فراصوتی که موج لمب^۵ نامیده می‌شود، استفاده می‌شود [۲]. در بازه‌ی فرکانس-ضخامت بالا، تحریک مد منفرد موج لمب به‌سادگی

¹ Nondestructive Testing (NDT)

² International Committee for Nondestructive Testing (ICNDT)

³ Ultrasonic Testing (UT)

⁴ Sokoloff

⁵ Lamb wave

امکان‌پذیر نیست. از این رو، در سال‌های اخیر از خوشه مدهای مرتبه بالا^۱ (HOMC) در بازه‌ی فرکانس-ضخامتی بالا استفاده شده است [۳].

در این رساله، انتشار موج HOMC در ورق بررسی می‌شود. با توجه به اینکه در زمینه‌ی موج HOMC پژوهش‌های زیادی انجام نشده است، در مورد ویژگی‌های این موج اطلاعات کاملی وجود ندارد. در این رساله، سعی بر آن است که بخش دیگری از ویژگی‌های موج HOMC شناسایی شود. در این راستا، تأثیر فرکانس-ضخامت تحریک بر مدهای موجود در موج HOMC بررسی می‌شود. برای شناسایی مدهای موجود در موج HOMC از روش تبدیل فوریه سریع دوبعدی^۲ (2D FFT) استفاده می‌شود. در ادامه، میزان حساسیت موج HOMC نسبت به عیب ترک سطحی در فرکانس-ضخامت‌های مختلف بررسی می‌شود. در این رساله با استفاده از روش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی موارد ذکر شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲- اهداف رساله

تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی استفاده از امواج لمب در شناسایی عیوب در سازه‌ها انجام شده است. در فرکانس-ضخامت‌های بالا، دشواری‌هایی در ایجاد مد منفرد موج لمب وجود دارد. از این رو، بیشتر پژوهش‌های پیشین در بازه‌ی فرکانس-ضخامت پایین انجام شده‌اند. هدف اصلی این رساله شناسایی عیوب در ورق با استفاده از امواج لمب فرکانس‌بالا و به‌طور خاص خوشه مدهای مرتبه بالا است. در راستای رسیدن به این هدف، مسیر زیر طی شده است:

- شبیه‌سازی انتشار موج HOMC در ورق برای شناسایی هرچه بیشتر ساختار و ویژگی‌های این موج
- بررسی تأثیر فرکانس تحریک بر مدهای موجود در موج HOMC و استفاده از روش 2D FFT در شناسایی مدها
- بررسی ساختار موج HOMC در فرکانس‌های مختلف و تعیین مد غالب در موج HOMC
- بررسی تأثیر فرکانس تحریک بر حساسیت موج HOMC نسبت به ترک سطحی با عمق‌های مختلف
- استفاده از موج HOMC در شناسایی عیب ترک سطحی در ورق به‌صورت تجربی
- تحریک موج لمب فرکانس‌بالا در ورق با استفاده از کفشک مخروطی ناقص با استفاده از

¹ Higher Order Modes Cluster (HOMC)

² 2D Fast Fourier Transform

شبه‌سازی عددی و آزمایش

۳-۱- نوآوری‌ها

نوآوری‌های رساله به شرح زیر است:

- ساختار موج HOMC و مدهای موجود در این موج برای اولین بار بررسی و شناسایی شده است. در پژوهش‌های پیشین گفته شده است که حساسیت موج HOMC نسبت به عیوب سطحی کم است، درحالی‌که در این پژوهش نشان داده شده است که ویژگی‌های موج HOMC تحت تأثیر مدهای موجود در این موج و به‌ویژه مد غالب است.
- ویژگی‌های موج HOMC تحت تأثیر مد غالب است و با شناسایی ویژگی‌های مد غالب می‌توان رفتار این موج را پیش‌بینی کرد. به‌طور مثال، توزیع جابه‌جایی و تنش در سطح مقطع سازه، متأثر از مد غالب است.
- تأثیر فرکانس تحریک بر ساختار موج HOMC برای اولین بار بررسی شده است. هرچند در پژوهش‌های پیشین موج HOMC با ویژگی‌های ثابت و غیرقابل‌تغییر معرفی شده است، اما نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس تحریک موج HOMC در بازه‌ی 15-35 MHz- mm مدهای موجود در این موج و مد غالب به سمت مدهای مرتبه‌بالا میل می‌کنند. بنابراین، ویژگی‌های موج HOMC ثابت نیست و رفتار این موج در فرکانس‌های مختلف، متفاوت است.
- تأثیر فرکانس تحریک بر حساسیت موج HOMC نسبت به عیب برای اولین بار بررسی شده است و نتایج نشان می‌دهد که حساسیت موج HOMC نسبت به عیب با تغییر فرکانس تحریک، تغییر می‌کند.
- برای اولین بار از کفشک مخروطی ناقص برای تحریک موج لمب فرکانس بالا استفاده شده است و عملکرد کفشک مخروطی ناقص با کفشک زاویه‌ای مقایسه شده است.

۴-۱- ساختار رساله

این رساله شامل شش فصل است و ساختار فصل‌ها به‌صورت زیر است:

در فصل اول، مقدمه ای از رساله ارائه شده و در ادامه به اهداف و ساختار رساله پرداخته شده است. در فصل دوم، به بررسی تئوری موج لمب و ویژگی‌های این موج پرداخته می‌شود. سپس خوشه مدهای مرتبه

بالا و روش تحریک آن شرح داده می‌شود. در ادامه پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی موج لمب و خوشه مدهای مرتبه بالا ارائه می‌شود. در فصل سوم، تجهیزات آزمایشگاهی و روش تحریک موج HOMC در ورق بررسی می‌شود. سپس به طراحی و ساخت کفشک مخروطی ناقص و کفشک زاویه‌ای برای تحریک موج لمب پرداخته می‌شود. در فصل چهارم، جزئیات شبیه‌سازی عددی انتشار موج لمب در ورق و پارامترهای مورد استفاده بررسی می‌شود. سپس پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی انتشار موج HOMC در ورق ارائه می‌شود. در ادامه شبیه‌سازی عددی تحریک موج لمب با استفاده از کفشک زاویه‌ای و کفشک مخروطی ناقص بررسی می‌شود. در فصل پنجم، نتایج حاصل از آزمایش‌ها و شبیه‌سازی عددی ارائه می‌شود. در ابتدا تأثیر فرکانس تحریک بر موج HOMC بررسی می‌شود و با استفاده از روش 2D FFT مدهای موجود در این موج شناسایی می‌شود. سپس تأثیر فرکانس تحریک بر حساسیت موج HOMC نسبت به عیب ترک سطحی در ورق بررسی می‌شود. در ادامه نتایج تحریک موج لمب در ورق با استفاده از کفشک زاویه‌ای و کفشک مخروطی ناقص با یکدیگر مقایسه می‌شود. در فصل ششم، نتایج حاصل از پژوهش و پیشنهاد پژوهش‌های آتی مرتبط با موضوع رساله ارائه می‌شود.

فصل دوم

بررسی اصول و مبانی موج

لمب و مرور ادبیات

۲-۱- مقدمه

در این فصل اصول کلی موج لمب و تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی موج لمب بررسی می‌شود. در ابتدا تاریخچه‌ی موج لمب و تعاریف کلی ارائه می‌شود. در ادامه، تعریف خوشه مدهای مرتبه بالا و روش تحریک آن ارائه می‌شود. در انتها نیز به مرور تحقیقات پیشین در زمینه‌ی امواج لمب و خوشه مدهای مرتبه بالا پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه دامنه‌ی تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی امواج لمب نسبت به مطالعات انجام شده روی خوشه مدهای مرتبه بالا وسیع‌تر است، در دو بخش مجزا به بررسی هر یک پرداخته می‌شود.

۲-۲- موج لمب

موج لمب ابتدا در سال ۱۹۱۷ توسط هوراس لمب^۱ در ادامه‌ی تحقیقات لرد ریلی^۲ کشف شد و اولین بار تحت مقاله‌ای با عنوان امواج در ورق الاستیک به چاپ رسید [۴]. در آن زمان به علت پیچیدگی تئوری این امواج، این مقاله از سوی مجامع علمی مورد استقبال قرار نگرفت. در سال ۱۹۴۵ در تحقیقی که آوزبورن و هارت^۳ انجام دادند مشخص شد که این امواج در سازه‌های زیر دریا در اثر انفجار به وجود می‌آید. پس از این تحقیق بسیاری به ویژگی‌های منحصر به فرد این امواج پی بردند و تحقیقات بسیاری در زمینه‌ی امواج لمب به صورت تئوری و تجربی انجام گرفت. از جمله، می‌توان به فایرستون و لینگ^۴ اشاره کرد که تحقیقات زیادی در زمینه‌ی امواج لمب انجام دادند [۴].

امواج حجمی^۵ امواجی هستند که در هنگام انتشار به هیچ مرزی برخورد نمی‌کنند، مانند امواجی که در محیط بی‌نهایت (یا شبه بی‌نهایت) منتشر می‌شوند. در واقع امواج حجمی در حجم ماده منتشر می‌شوند و از مرزها دور هستند. از سوی دیگر، امواج هدایت‌شده^۶ برای انتشار نیازمند مرزهایی مانند ورق‌ها، لوله‌ها و میله‌ها هستند. بین امواج حجمی و امواج هدایت‌شده تفاوت‌های بنیادی وجود دارد، اما معادلات کلی حاکم بر هر دو یکسان است. در حل معادلات امواج حجمی شرط مرزی وجود ندارد در صورتی که در حل معادلات امواج هدایت‌شده

¹ Horace Lamb

² Lord Rayleigh

³ Osborne and Hart

⁴ Firestone and Ling

⁵ Bulk waves

⁶ Guided waves

باید شرط مرزی ارضا شود. تفاوت دیگر بین امواج حجمی و امواج هدایت شده در تعداد مدهای ایجاد شده است. در امواج حجمی تعداد محدودی مد (طولی^۱، عرضی افقی^۲ و عرضی عمودی^۳) وجود دارد در حالی که در امواج هدایت شده بی نهایت مد ایجاد می شود به طوری که در یک جسم محدود تعداد نامحدودی مد می تواند ایجاد شود. امواج هدایت شده قابلیت انتشار در مسافت های طولانی با حداقل میرایی را دارند، به همین دلیل انتخاب مناسبی برای بسیاری از کاربردها از جمله کنترل سلامت سازه ها هستند. علاوه بر این با توجه به اینکه در بسیاری از ساختارها از ورق های نازک استفاده می شود، استفاده از امواج ورقی روش مناسبی برای این ساختارها است. امواج سطحی^۴ (ریلی^۵) و امواج ورقی^۶ (لمب) امواج هدایت شده هستند. امواج ریلی در سطح آزاد ماده انتشار می یابند. در انتشار امواج سطحی، انرژی موج عمدتاً در سطح ماده تمرکز یافته و در نتیجه موج می تواند مسافتی طولانی را بر روی سطح ماده طی کند. امواج لمب در ورق های نازک منتشر می شوند. منظور از ورق، قطعه ای است که یکی از ابعاد آن در مقایسه با ابعاد دیگر خیلی کوچک باشد، در واقع امواج لمب در نتیجه وجود دو سطح آزاد موازی ایجاد می شوند. امواج لمب در استوانه ها نیز منتشر می شوند [۵].

امواج لمب از تداخل امواج طولی و عرضی در زوایای تابش مشخصی ایجاد می شوند. هنگامی که موج در ورق منتشر می شود، با مرز ورق برخورد می کند و در اثر برخورد، تغییر حالت می دهد و به امواج طولی و عرضی تبدیل می شود. این روند برای امواج طولی و عرضی به دست آمده نیز تکرار می شود. این تغییر حالت ها تا جایی ادامه پیدا می کند که دیگر امواج طولی و عرضی قابل تفکیک نباشند و یک الگوی تداخلی مشاهده شود به صورتی که تمامی ورق به صورت یک مجموعه ی واحد به ارتعاش درآمده و موج لمب در آن ایجاد می شود. به همین علت مدهای متفاوتی در اثر تداخل های مختلف ایجاد می شوند [۴].

امواج لمب به دو نوع اصلی متقارن^۷ و نامتقارن^۸ تقسیم می شوند که هر نوع از این امواج نیز دارای مدهای مختلفی هستند. معمولاً امواج لمب متقارن با حرف S و امواج لمب نامتقارن با حرف A نمایش داده می شوند. مد هر یک از امواج نیز با اعدادی که در زیر این حروف قرار داده می شود، معین می گردد؛ برای مثال

¹ Longitudinal

² Shear horizontal (SH)

³ Shear vertical (SV)

⁴ Surface waves

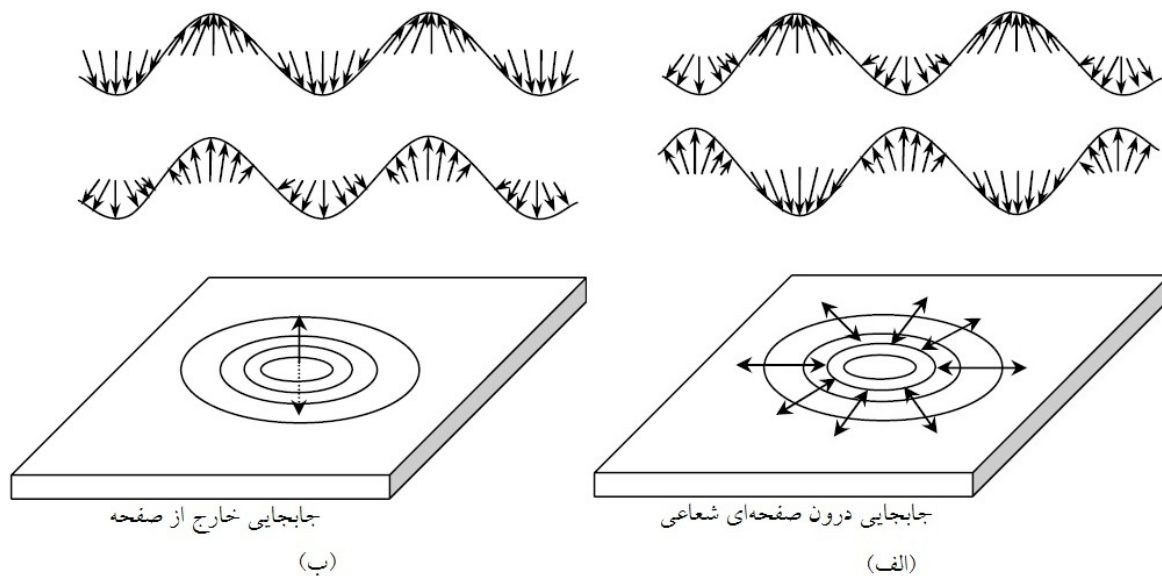
⁵ Rayleigh waves

⁶ Plate waves

⁷ Symmetric

⁸ Anti-symmetric

موج S_0 و S_1 ، به ترتیب دو مد اول و دوم موج لمب متقارن هستند. در شکل ۱-۲ مدهای متقارن و نامتقارن موج لمب نشان داده شده‌اند. مدهای متقارن بیشتر دارای جابه‌جایی دایره‌ای و درون صفحه‌ای هستند در حالی که مدهای نامتقارن بیشتر جابه‌جایی خارج از صفحه دارند. بنابراین، مد متقارن اغلب به‌عنوان مد فشاری^۱ شناخته می‌شود که نشان‌دهنده‌ی برآمدگی^۲ و انقباض^۳ ورق است. مد نامتقارن نیز اغلب به‌عنوان مد خمشی^۴ شناخته می‌شود که نشان‌دهنده‌ی خمش با ضخامت ثابت است. مدهای نامتقارن مرتبه بالا، به علت جابه‌جایی در ضخامت، پیچیدگی زیادی دارند. تحت شرایط تحریک یکسان، اغلب بزرگی و شدت مدهای متقارن از مدهای نامتقارن کمتر است.



شکل ۱-۲- (الف) مد متقارن موج لمب، (ب) مد نامتقارن موج لمب [۴]

مباحث ذکر شده برای ورق با سطح آزاد را می‌توان به ورق‌های با سطح غیرآزاد مانند ورق در زیر آب یا خاک که در جهت عرضی نمی‌توانند حرکت کنند، نیز بسط داد. برای مثال برای ورقی که در آب غوطه‌ور است مدهای متقارن عمدتاً داخل ورق باقی می‌مانند چرا که عبور حرکات درون صفحه‌ای از سطح مشترک سیال و ورق دشوار است. بنابراین، برای مدهای متقارن، نشت انرژی مشخصی از ورق به آب وجود ندارد، هرچند انرژی ناشی از حرکات برون صفحه‌ای مدهای نامتقارن از ورق به داخل آب نشت می‌کند. این حالت به‌عنوان امواج

¹ Compressional

² Bulging

³ Contracting

⁴ Flexural

لمب نشت‌کننده^۱ در ورق غوطه‌ور در آب شناخته می‌شود. در مورد حالت زیر خاک مانند لوله‌های نفت دفن شده، امواج لمب نشت‌کننده از مشارکت مدهای متقارن و نامتقارن ایجاد می‌شود. با اعمال شرایط مرزی در سطح مشترک ورق با آب یا خاک می‌توان جزئیات بیشتری از امواج لمب نشت‌کننده را به دست آورد [۴].

۲-۳- پاشندگی^۲

در آزمون‌های فراصوتی از یک موج پیوسته‌ی تک‌فرکانس استفاده نمی‌شود، بلکه از مجموعه‌ای از امواج سینوسی با فرکانس‌های متفاوت یعنی موج پالسی استفاده می‌شود. در فلزات غالباً سرعت موج مستقل از فرکانس موج است ولی در موادی مانند پلاستیک‌ها، مواد کامپوزیتی، مواد متخلخل و یا قطعاتی که هندسه‌ی خاصی دارند (مانند میله‌ها و ورق‌ها)، سرعت انتشار موج تابعی از فرکانس موج است. این خاصیت، پاشندگی نام دارد و امواجی که دارای خاصیت پاشندگی هستند را امواج پاشنده^۳ می‌نامند. امواج لمب نیز مانند اغلب امواج هدایت‌شده، پاشنده هستند، یعنی سرعت انتشار موج به فرکانس موج وابسته است. در امواج پاشنده، امواج سینوسی که سرعت‌های متفاوتی دارند، با هم ترکیب شده و به صورت یک دسته موج در ماده حرکت می‌کنند. در واقع در این امواج دو سرعت وجود دارد. یکی از این سرعت‌ها **سرعت فاز^۴** یعنی **سرعت متوسط** موج‌های سینوسی است و دیگری سرعت گروه^۵ یعنی سرعتی است که مجموعه‌ی امواج سینوسی با آن سرعت حرکت می‌کنند [۴]. خاصیت پاشندگی موجب تغییر سیگنال نسبت به زمان و مکان می‌شود. یعنی با افزایش فاصله‌ی موج از فرستنده، بازه‌ی زمانی سیگنال ارسالی افزایش می‌یابد (شکل ۲-۲) و امکان روی هم افتادن سیگنال‌های دریافتی نزدیک به هم ایجاد می‌شود. این پدیده موجب کاهش تفکیک‌پذیری و مشکل شدن تفسیر نتایج تجربی می‌شود [۶, ۷].

¹ Leaky Lamb waves

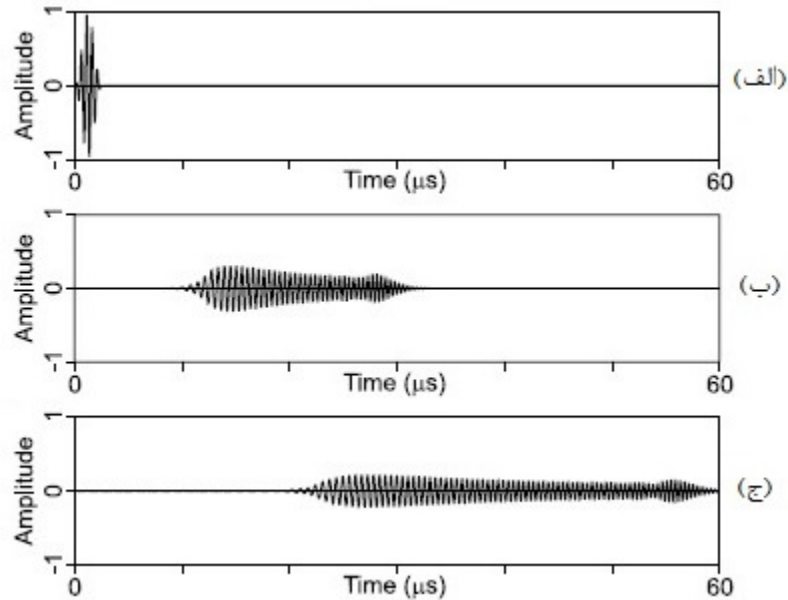
² Dispersion

³ Dispersive

⁴ Phase velocity

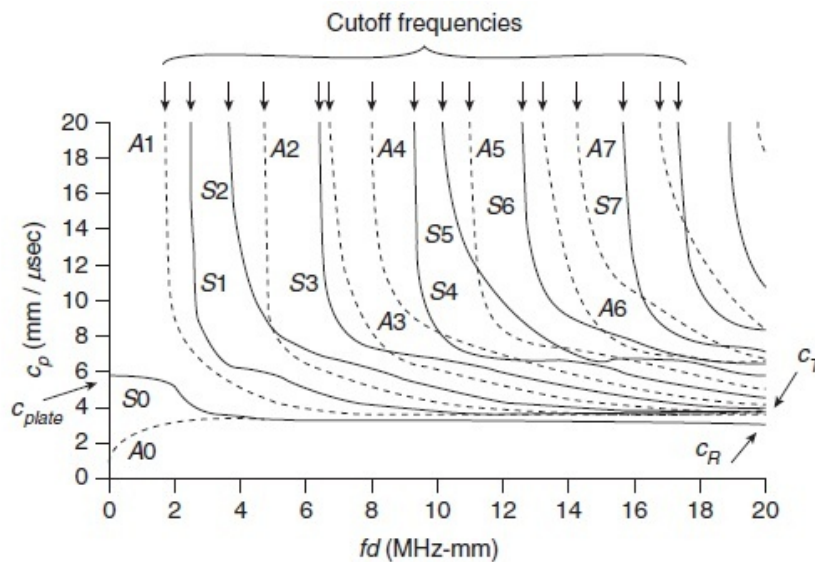
⁵ Group velocity

⁶ Signal overlap



شکل ۲-۲- شبیه‌سازی انتشار مد S_0 در ورق آلومینیومی با ضخامت 1 mm و در فرکانس 2 MHz: (الف) در نزدیکی فرستنده، (ب) در فاصله‌ی 50 mm از فرستنده، (ج) در فاصله‌ی 100 mm از فرستنده [۷]

خاصیت پاشندگی یکی از ویژگی‌هایی است که موج لمب را از موج حجمی متمایز می‌کند. علاوه بر این در انجام آزمایش و انتخاب فرکانس مورد نظر برای آزمایش نیز مؤثر است. به دلیل اهمیت این ویژگی، نمودار پاشندگی که رابطه‌ی بین سرعت فاز یا سرعت گروه و حاصل ضرب فرکانس در ضخامت ورق را نشان می‌دهد، تدوین شده است. در شکل ۲-۳ منحنی پاشندگی موج لمب در ورق آلومینیومی نشان داده شده است.



شکل ۲-۳- منحنی پاشندگی موج لمب در ورق آلومینیومی [۵]

در شکل ۲-۳ هر یک از خطوط معرف یکی از مدهای نوسانی موج لمب است. این نمودار به صورت نامحدود ادامه دارد که بیانگر تعداد بی‌شمار مدهای ارتعاشی موج لمب است. از نمودار پاشندگی برای شناسایی شرایط لازم برای ایجاد مد مورد نظر استفاده می‌شود. با توجه به شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود که مد S_0 در فرکانس‌های پایین، خاصیت پاشندگی کمی دارد چرا که نمودار پاشندگی این مد در فرکانس‌های پایین تقریباً افقی است یا به عبارتی سرعت به فرکانس وابسته نیست. به همین علت معمولاً آزمایش‌های تشخیص عیوب توسط امواج لمب در این محدوده‌ی فرکانس-ضخامت انجام می‌شود [۴]. در فرکانس‌های بالاتر معمولاً چندین مد به طور همزمان ایجاد می‌شود که موجب پیچیدگی بازرسی می‌شود. با افزایش ضخامت ورق در فرکانس ثابت، تعداد مدهای ایجاد شده افزایش می‌یابد و با کاهش فرکانس برای رسیدن به محدوده‌ی ناپاشنده، تفکیک‌پذیری^۱ در شناسایی عیوب نیز کم می‌شود. این مسئله یکی از محدودیت‌های امواج لمب فرکانس پایین در بازرسی ورق‌های با ضخامت بالا است. همان‌طور که در شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود، دو مد اولیه S_0 و A_0 در فرکانس‌های بالا به یک مجانب افقی با سرعتی برابر با سرعت موج ریلی (CR) در ورق و سایر مدها به مجانب افقی با سرعت موج عرضی (CT) در ورق میل می‌کنند.

معمولاً منحنی پاشندگی به صورت بی‌بعد رسم می‌شود که تنها وابسته به جنس ورق است و می‌توان از آن برای ورق‌هایی با ضخامت‌های مختلف استفاده کرد. علاوه بر این اگر نمودار پاشندگی براساس سرعت گروه رسم شود، می‌توان مدها را از روی منحنی شناسایی کرد. منحنی پاشندگی به خواص الاستیسیته‌ی هر ماده وابسته است و از حل عددی رابطه‌ی بین عدد موج^۲ و فرکانس (معادله پاشندگی^۳)، به دست می‌آید. برای رسم منحنی پاشندگی می‌توان از نرم‌افزارهای گوناگونی مانند دیسپرس^۴، پک شیر^۵، والن^۶ و GUIGUW^۷ استفاده کرد. قابل ذکر است که از این نرم‌افزارها می‌توان برای رسم منحنی مواد ناهمسانگرد نیز استفاده نمود. چنانچه با استفاده از معادله‌ی پاشندگی، تغییرات فرکانس بر حسب عدد موج رسم شود، منحنی طیف فرکانسی^۸ به دست می‌آید. در

¹ Resolution

² Wave number

³ Dispersion equation

⁴ Disperse

⁵ Pack share

⁶ Vallen

⁷ Graphical User Interface for Guided Ultrasonic Waves

⁸ Frequency spectrum

این منحنی به محل تقاطع منحنی با محور عمودی، فرکانس قطع^۱ گفته می‌شود. در منحنی پاشندگی نیز فرکانسی که در آن منحنی‌ها با محور عمودی مجانب می‌شوند، متناظر با فرکانس قطع است (شکل ۲-۳).

۲-۴- مزایا و محدودیت‌های موج لمب

در حال حاضر موج لمب پرکاربردترین موج فراصوتی هدایت‌شده در شناسایی عیوب است. برای استفاده‌ی مناسب از موج لمب باید مزایا و محدودیت‌های آن، کاملاً شناخته شوند. مزایای موج لمب در کاربردهای ارزیابی غیرمخرب عبارتند از:

- استهلاک کم در مقایسه با سایر امواج
- توانایی بازرسی سطوح بسیار بزرگ
- توانایی بازرسی سطوح منحنی
- قابلیت شناسایی عیوب داخلی و سطحی با حساسیت بالا
- امکان دسته‌بندی عیوب با استفاده از مدهای مختلف موج لمب
- امکان بازرسی بخش‌های روکش‌دار و قطعات زیر آب و خاک

در کنار این مزایا، استفاده از موج لمب با محدودیت‌هایی روبرو است. این محدودیت‌ها عبارتند از:

- پیچیده بودن سیگنال موج لمب
- تأثیر شدید عوامل محیطی از جمله دما، ارتعاشات سازه و جز این‌ها بر روی موج لمب
- نیاز به پردازش سیگنال برای رسیدن به نتیجه‌ی مناسب [۸]

۲-۵- روش‌های ارسال و دریافت موج لمب

برای ارسال و دریافت موج لمب از روش‌های متنوعی مانند کاوند فراصوتی^۲، المانهای پیزوالکتریک^۳، فراصوت لیزری^۴، تراگذارهای بین انگشتی^۵ و حسگرهای فیبر نوری^۶ استفاده می‌شود. در ادامه هر یک از این

¹ Cutoff frequency

² Ultrasonic probes

³ Piezoelectric elements

⁴ Laser-based ultrasonics

⁵ Interdigital transducers (IDT)

⁶ Fiber-optic sensors

روش‌ها به اختصار شرح داده می‌شود.

۲-۵-۱- کاوند فراصوتی

ساختمان یک کاوند فراصوتی پیزوالکتریک شامل یک بلورهی پیزوالکتریک، ماده‌ی پشتی^۱ و لایه‌ی تطابق^۲ است. کاوند در یک زاویه‌ی مشخص مد خاصی از موج لمب را ایجاد می‌کند. معمولاً موقعیت‌دهی کاوند در زاویه معین توسط کفشکی از جنس پرسپکس^۳ با زاویه‌ی ثابت یا متغیر انجام می‌شود. این نوع تراگذارها به علت دقت بالایی که دارند، برای تولید امواج لمب بسیار مناسب هستند [۴].

۲-۵-۲- المان‌های پیزوالکتریک

در این روش المان‌های پیزوالکتریک به طور مستقیم روی سطح قطعه چسبانده می‌شوند. در اثر ارتعاش المانها موج لمب در ورق ایجاد می‌شود. بلوره‌های به کار رفته در این حالت معمولاً از نوع زیرکونات تیتانات سرب^۴ هستند. این بلوره‌ها محدوده‌ی فرکانسی گسترده، امپدانس صوتی کم و قیمت پایینی دارند. مشکلی که در استفاده از المانها وجود دارد ایجاد چند مد به طور همزمان است، همچنین در دمای بالا، بلوره رفتارهای غیرخطی نشان می‌دهد، هرچند این مشکل با استفاده از پیزوکامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف، قابل حل است [۴].

۲-۵-۳- فراصوت لیزری

یکی از روش‌های غیرتماسی برای ارسال و دریافت موج لمب استفاده از لیزر است. در این روش موج لمب توسط منبع لیزر^۵ ارسال و توسط تداخل‌سنج لیزری^۶ دریافت می‌شود. به علت کنترل‌پذیری این روش، امکان تولید موج با باند فرکانسی پهن یا باریک وجود دارد. این روش بیشتر برای سطوح نامنظم، هندسه‌های پیچیده یا محیط‌های با دسترسی مشکل که امکان تماس مستقیم تراگذار با سطح مورد بازرسی وجود ندارد، کاربرد دارد. یکی از محدودیت‌های استفاده از این روش هزینه‌ی بالای تجهیزات است [۴].

¹ Backing material

² Matching layer

³ Perspex

⁴ Lead zirconate titanate (PZT)

⁵ Laser source

⁶ Laser interferometer

۲-۵-۴- تراگذارهای بین انگشتی^۱

این نوع تراگذار متشکل از ماده‌ی پیزوالکتریک پلی‌وینی‌لیدین فلوراید^۲ و الکترودهایی با چیدمان مشخص است. با طراحی دقیق الکترودها و تنظیم فاصله‌ی بین الکترودها، می‌توان مد خاصی از موج لمب را با پهنای باند و طول موج دلخواه ایجاد کرد. این تراگذارها در مقایسه با المانهای پیزوالکتریک، انعطاف‌پذیری بیشتری دارند و استفاده از آنها آسان‌تر است. این تراگذارها به راحتی شکل گرفته و خود را با انحناهای سطح هماهنگ می‌کنند. در بیشتر پژوهش‌های انجام شده از این تراگذارها به علت مدول الاستیسیته‌ی کم و رفتار ویسکوالاستیک، فقط به‌عنوان گیرنده استفاده شده است [۹].

پلی‌وینی‌لیدین فلوراید به فاکتورهای محیطی به خصوص دما حساس است به همین علت اغلب به‌عنوان دماسنج استفاده می‌شود. تراگذارهای بین انگشتی قدیمی به طور ثابت روی سطح بازرسی متصل می‌شدند اما امروزه تراگذارهایی تولید شده‌اند که امکان جابه‌جایی و چرخش روی سطح را دارند. تراگذارهای بین انگشتی در مقایسه با المان پیزوالکتریک PZT دقیق‌تر هستند و استفاده از آنها آسان‌تر است، به همین دلیل جایگزین مناسبی برای این المان هستند [۴].

۲-۵-۵- حسگرهای فیبر نوری

این نوع حسگرها به علت ویژگی‌هایی مانند پهنای باند بالا، سازگاری مناسب، عدم تداخل الکترومغناطیسی، طول عمر بالا، توان مصرفی پایین، وزن سبک و حجم کم، کاربرد گسترده‌ای دارند. این حسگرها در دریافت کرنش استاتیک بسیار خوب عمل می‌کنند. از این حسگرها به طور محدود به‌عنوان گیرنده‌ی موج لمب نیز استفاده می‌شود. یکی از محدودیت‌های استفاده از این حسگرها به‌عنوان گیرنده، تأثیر عوامل محیطی و جهت قرارگیری حسگر بر دقت اندازه‌گیری است [۴].

۲-۵-۶- کاربردهای امواج لمب

امواج لمب به علت ویژگی‌های منحصر به فرد در صنایع مختلف کاربرد دارند. عمده‌ترین کاربرد امواج لمب در شناسایی موقعیت و مشخصات عیوب است. در ادامه به برخی از کاربردهای موج لمب اشاره شده است.

¹ Interdigital transducers

² Polyvinylidene fluoride (PVDF)

۲-۵-۷- بازرسی خطوط لوله

امواج لمب، میرایی کمی دارند. به همین دلیل از این امواج می‌توان برای بازرسی خطوط طولانی لوله استفاده کرد. دو روش زمان پرواز^۱ و پرش‌نگاری^۲ برای شناسایی خوردگی در خطوط انتقال نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش زمان پرواز با اندازه‌گیری زمان بازگشت موج بازتابی از عیب، محل عیب شناسایی می‌شود. این روش برای قطعات با طول زیاد، مناسب است [۴]. در روش پرش‌نگاری با استفاده از تعدادی فرستنده و گیرنده و بررسی پرتوهای انتشاری و دریافتی خوردگی در لوله‌ها مشخص می‌شود. در این روش از روی تغییرات سرعت فاز و سایر ویژگی‌های موج، محل و اندازه عیب مشخص می‌شود. این روش برای بازرسی بخش‌های کوچک مناسب است [۱۰].

۲-۵-۸- پایش سلامت سازه^۳

در این روش با اتصال المانهای تیتانات زیرکونات سرب به بخش‌های مختلف سیستم و ایجاد شبکه‌ای از حسگرها، در حین فعالیت سیستم، آن را مورد ارزیابی قرار می‌دهند. این روش در سیستم‌های هوافضا کاربرد گسترده‌ای دارد [۱۱].

۲-۵-۹- تعیین ثابت‌های الاستیک

یکی از کاربردهای موج لمب، تعیین ثابت‌های الاستیک مواد مختلف است. در این روش به وسیله‌ی تعیین رابطه‌ی بین سرعت گروه صفر^۴ و ثابت‌های الاستیک، این مقادیر مشخص می‌شوند. علاوه بر این با بررسی سرعت گروه صفر، ضخامت ورق با دقت بالایی به دست می‌آید [۱۲].

۲-۵-۱۰- بازرسی قطعات کامپوزیتی

در قطعات کامپوزیتی به علت وجود ساختار چندلایه‌ای، استهلاک موج بسیار زیاد است، به همین دلیل نمی‌توان برای بازرسی این قطعات از امواج حجمی استفاده کرد. برای بازرسی این قطعات می‌توان از امواج لمب استفاده کرد [۵].

¹ Time of flight (TOF)

² Tomography

³ Structural health monitoring (SHM)

⁴ Zero group velocity (ZGV)

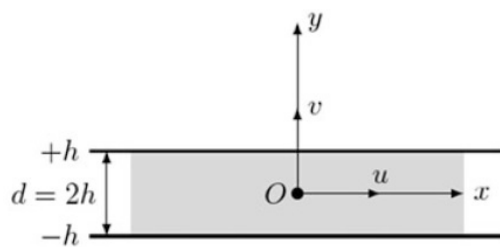
۲-۵-۱۱- استفاده در حسگرها

از آنجایی که امواج لمب به تغییرات ضخامت و عوامل محیطی، حساسیت بالایی دارند، از این امواج در ساخت حسگرها استفاده می‌شود. از جمله می‌توان به حسگر دما [۱۳]، حسگر فشار [۱۴]، حسگرهای تعیین خواص سیالات از جمله چگالی [۱۵]، غلظت [۱۶، ۱۷]، خواص گازها [۱۸] و جریان گاز [۱۹]، حسگر تعیین سختی [۲۰] و حسگر خواص سطح [۲۱] اشاره کرد.

۲-۶- انتشار موج لمب

معادله انتشار موج لمب در ورق که به معادلات ریلی- لمب معروف است، یکی از معادلات مهم در زمینه‌ی انتشار موج لمب است، چراکه حل این معادله منجر به دستیابی به منحنی پاشندگی می‌شود. برای محاسبه‌ی معادله‌ی انتشار موج روش‌های متفاوتی از جمله استفاده از توابع پتانسیل وجود دارد. در ادامه این روش به طور خلاصه ارائه می‌شود.

سیستم مختصات در ورق و مؤلفه‌های جابه‌جایی موج لمب در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. در شکل ۲-۴، نقطه‌ی O مرکز مختصات، d ضخامت ورق، x و y محورهای مختصات و u و v به ترتیب مؤلفه‌های جابه‌جایی در راستای محورهای x و y هستند. راستای گسترش ورق در جهت مثبت و منفی محور x است.



شکل ۲-۴- سیستم مختصات در ورق و مؤلفه‌های جابه‌جایی موج لمب [۲۲]

یکی از فرضیات اساسی در انتشار موج لمب در ورق الاستیک این است که سطوح بالایی و پایینی ورق بدون تنش هستند و بردار جابه‌جایی در فرایند انتشار موج تنها شامل مؤلفه‌های جابه‌جایی در راستای محورهای x و y است و در واقع یک مسئله‌ی کرنش صفحه‌ای است. مراحل دستیابی به معادله‌ی موج لمب را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

معادله‌ی الاستودینامیک که به معادله‌ی موج ناویر^۱ معروف است، به صورت زیر است:

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad ۱-۲$$

که در این معادله، \mathbf{u} بردار جابه‌جایی، λ و μ ثابت‌های لامه^۲ و ρ چگالی است. تابع پتانسیل برای تجزیه‌ی بردار جابه‌جایی استفاده می‌شود (تجزیه‌ی هلمهولتز^۳)، بنابراین، می‌توان بردار جابه‌جایی را به شکل زیر نشان داد:

$$\mathbf{u} = \nabla \Phi + \nabla \times \Psi \quad ۲-۲$$

که Φ و Ψ به ترتیب تابع پتانسیل اسکالر و برداری هستند. از توابع پتانسیل برای بیان معادله‌ی موج الاستودینامیک استفاده می‌شود و با حل معادله‌ی موج، توابع پتانسیل به شکل زیر به دست می‌آیند:

$$\Phi = \Phi(y) e^{i(kx - \omega t)} \quad ۳-۲$$

$$\Psi = \Psi(y) e^{i(kx - \omega t)} \quad ۴-۲$$

در معادلات فوق، k عدد موج، ω فرکانس زاویه‌ای و Ψ مؤلفه‌ی z بردار Ψ است. روابط به دست آمده برای توابع پتانسیل بیانگر تغییر موج در راستای x و ثابت بودن آن در راستای y است. توابع $\Phi(y)$ و $\Psi(y)$ را می‌توان به صورت زیر فرض کرد:

$$\Phi(y) = A_1 \sin(py) + A_2 \cos(py) \quad ۵-۲$$

$$\Psi(y) = B_1 \sin(qy) + B_2 \cos(qy) \quad ۶-۲$$

در معادلات فوق A_1, A_2, B_1, B_2 ضرایب مجهول هستند و روابط زیر نیز برقرار است:

$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_l^2} - k^2 \quad ۷-۲$$

$$q^2 = \frac{\omega^2}{c_s^2} - k^2 \quad ۸-۲$$

در معادلات فوق، c_l سرعت موج طولی و c_s سرعت موج عرضی (برشی) است.

با استفاده از روابط کرنش-جابه‌جایی و تنش-کرنش در تئوری الاستیسیته، توابع پتانسیل در محاسبه‌ی تنش وارد می‌شوند. با اعمال شرط مرزی بدون تنش بودن صفحات بالایی و پایینی ورق، معادله‌ای به دست می‌آید که در واقع معادله‌ی سیستم همگن خطی است و در این معادله ضرایب معادلات ۵-۲ و ۶-۲ مجهول هستند. برای دستیابی به یک جواب غیربديهی، ماتریس ضرایب مجهول معادله‌ی سیستم همگن خطی باید برابر با صفر قرار

¹ Navier wave equation

² Lamé constants

³ Helmholtz decomposition

داده شود و در نهایت معادله‌ی پاشندگی به دست می‌آید. با حل عددی معادله‌ی پاشندگی، منحنی پاشندگی سرعت فاز (c_{ph}) به دست می‌آید. منحنی پاشندگی سرعت گروه (c_g) از منحنی پاشندگی فرکانسی سرعت فاز طبق رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$c_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c_{ph}^2}{c_{ph} - f \frac{dc_{ph}}{df}} \quad 9-2$$

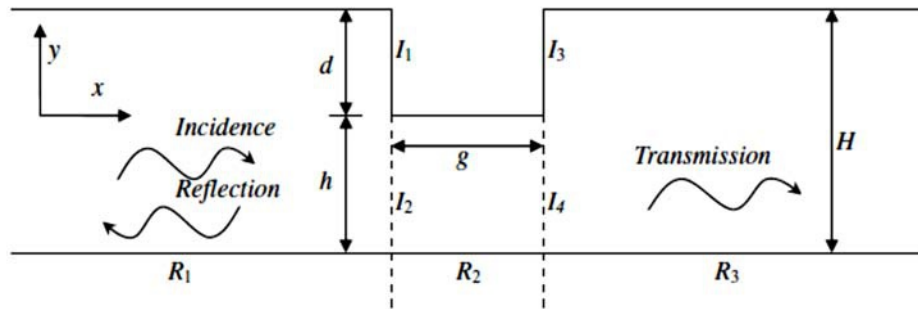
که در آن f فرکانس موج است. بر طبق تقارن مؤلفه‌های جابه‌جایی صفحه‌ی میانی ورق، موج لمب به دو نوع متقارن و نامتقارن تقسیم می‌شود. معادلات ۱۰-۲ و ۱۱-۲ به ترتیب معادله‌ی پاشندگی موج لمب متقارن و نامتقارن را نشان می‌دهند [۵].

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2pq}{(k^2 - q^2)^2} \quad 10-2$$

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(k^2 - q^2)^2}{4k^2pq} \quad 11-2$$

۷-۲- تأثیر عیب بر روی سیگنال

گسترش امواج لمب در محیط‌های فاقد عیب با توجه به خواص پاشندگی باعث تغییراتی در سیگنال می‌شود، زیرا در این حالت سرعت فاز به فرکانس وابسته بوده و سیگنال ورودی با سیگنال خروجی متفاوت خواهد بود [۵]. در محیط‌هایی که عیب وجود دارد تغییرات زیادی در سیگنال حاصل خواهد شد. در اثر برخورد موج با ناحیه معیوب بخشی از عیب بازتاب و بخشی عبور می‌کند (شکل ۵-۲). سیگنال ارسالی تحت شرایطی می‌تواند تبدیل به مد دیگری شود. در این صورت برای مثال مد ارسالی S_0 علاوه بر اینکه با مد یکسان بازتاب یا عبور می‌کند، مد A_0 نیز تولید می‌کند. با توجه به نتایج تحقیقات آلین ارزیابی ضرایب عبور و بازتاب یکی از مواردی است که می‌توان برای تعیین مشخصات عیب استفاده کرد [۲۳]. علاوه بر این ضرایب تبدیل موج که ناشی از تبدیل مد در اثر برخورد با عیب است از موارد تعیین مشخصات عیب است [۲۴].



شکل ۲-۵- طرح‌واره‌ی عبور و بازتاب موج در برخورد با عیب [۲۵]

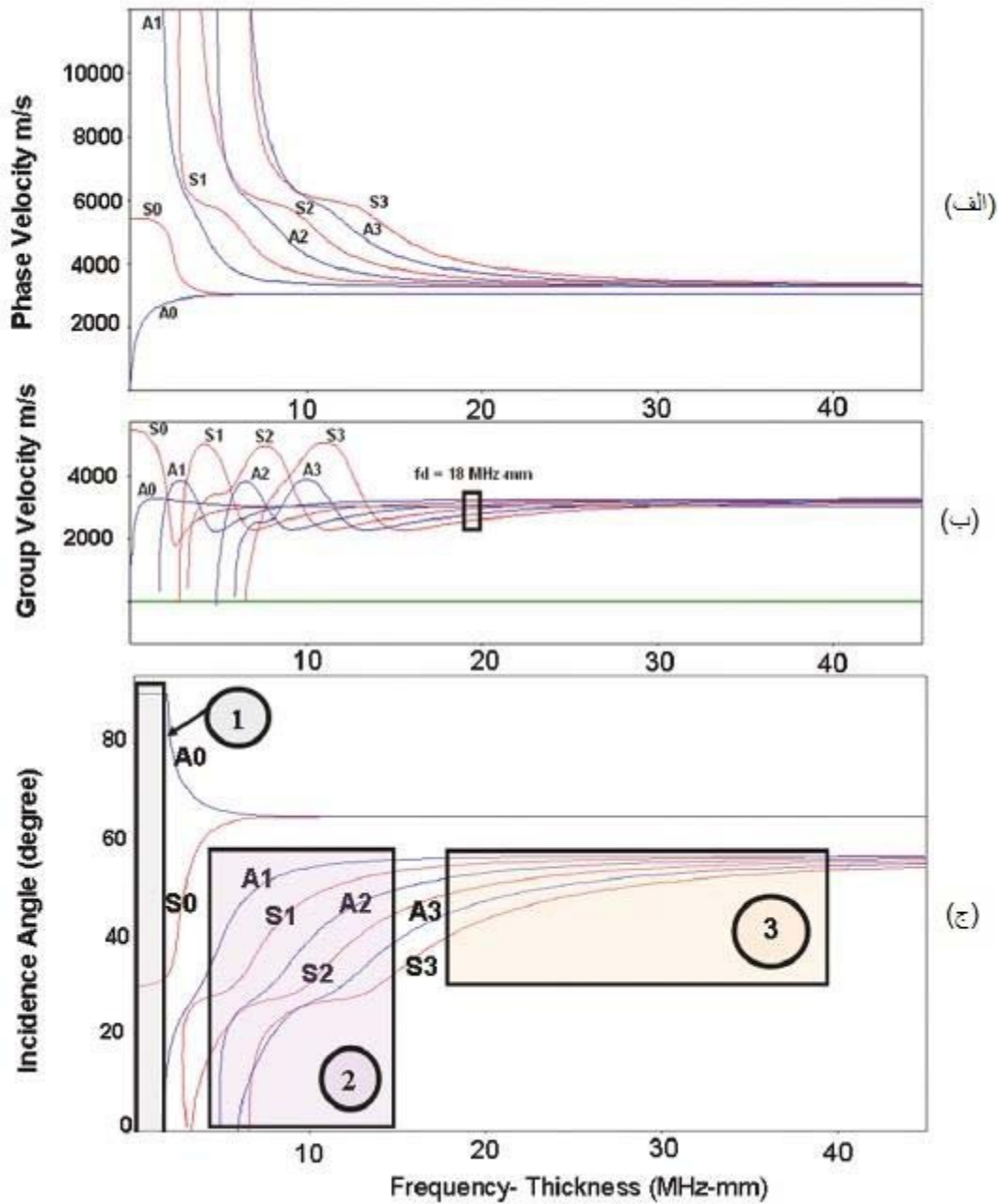
۲-۸- خوشه مدهای مرتبه بالا

آزمون‌های غیرمخرب بر پایه‌ی امواج هدایت‌شده معمولاً در رژیم فرکانس پایین با تأکید بر بکارگیری مدهای مرتبه پایین ناپاشنده هستند، اما طول موج نسبتاً بلند این مدها باعث کاهش تفکیک‌پذیری آزمون‌ها می‌شود. این مشکل را می‌توان با استفاده از امواج هدایت‌شده‌ی فرکانس بالا حل کرد. بکارگیری خوشه مدهای مرتبه بالا که اخیراً کشف شده است، برای رسیدن به این هدف مؤثر است. امواج HOMC شامل چندین مد مرتبه بالا هستند که با یکدیگر به صورت یک دسته حرکت می‌کنند و در مسافت‌های چند متری بدون پاشندگی بوده و دارای حاصل‌ضرب فرکانس-ضخامتی در بازه‌ی 15 MHz.mm تا 35 MHz.mm هستند [۲۶]. از دیگر مزایای بازرسی با امواج HOMC نسبت به امواج فرکانس پایین می‌توان به امکان بازرسی عیوب کوچک در حد میکرو و عدم نیاز به پردازش سیگنال پیشرفته اشاره کرد. موج HOMC را می‌توان به وسیله‌ی تراگذار پیزوالکتریک و کفشک مناسب تولید کرد [۲۷]. همچنین با استفاده از تراگذارهای فراصوتی الکترومغناطیس^۱ (EMAT) نیز می‌توان این موج را ایجاد کرد [۲۸]. در شکل ۲-۶ (الف) سرعت فاز مدهای مختلف به صورت تابعی از حاصل‌ضرب فرکانس-ضخامت نشان داده شده است. بخش مسطح منحنی نشان‌دهنده‌ی بخش ناپاشنده منحنی پاشندگی است و بخش شیب‌دار نشان‌دهنده‌ی بخش پاشنده‌ی منحنی است. شکل ۲-۶ (ج) نشان‌دهنده‌ی زاویه مناسب کفشک پرسپکس برای تولید مدهای مختلف است. برای مثال برای تولید مد S₀ در حاصل‌ضرب فرکانس-ضخامت 1.5 MHz.mm کفشک پرسپکس با زاویه‌ی ۳۰ درجه نیاز است. بخشی از منحنی شکل ۲-۶ (ج) که با عدد ۲ مشخص شده است، مربوط به مدهای مرتبه بالا^۲ در بازه‌ی فرکانس-ضخامت 3 MHz.mm تا 10

¹ Electromagnetic acoustic transducer

² Higher Order Mode (HOM)

MHz.mm است که نسبت به مدهای بنیادی^۱ (A_0 و S_0) قابلیت تفکیک پذیری بیشتری دارند. اما کار با مدهای مرتبه بالا به علت پاشنده بودن و ایجاد مدهای مختلف به طور همزمان، دشوار است [۳].



شکل ۲-۶- منحنی پاشندگی ورق آلومینیومی: (الف) منحنی سرعت فاز، (ب) منحنی سرعت گروه، (ج) زاویه تحریک مدها با استفاده از کفشک پرسپیکس [۳]

^۱ Fundamental modes

بخشی از شکل ۲-۶ (ج) که با عدد ۳ مشخص شده است مربوط به خوشه مدهای مرتبه بالا است و در بازه‌ی فرکانس-ضخامت 15 MHz.mm تا 35 MHz.mm قرار دارد و موضوع تحقیق پیش رو است. مدهای موجود در این رژیم تفاوت بسیار کمی در سرعت گروه و زاویه‌ی تحریک دارند (جدول ۲-۱). با توجه به تفاوت کم در سرعت گروه مدها و نزدیک بودن زاویه‌ی تحریک مدها، در هر مقدار فرکانس-ضخامت دلخواه در این رژیم، دسته موجی از مدهای مختلف ایجاد خواهد شد. با توجه با اینکه مدهای مختلف با سرعت گروه نزدیک به هم حرکت می‌کنند، می‌توان گفت که یک دسته مد ناپاشنده در قطعه ایجاد می‌شود. با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمایش می‌توان زاویه‌ی مناسب برای تولید موج HOMC را به نحوی که کمترین پاشندگی را داشته باشد تعیین نمود [۳].

جدول ۲-۱-زاویه‌ی تحریک و سرعت گروه مدهای مختلف در ورق آلومینیومی در 18 MHz.mm [۳]

مدهای مرتبه بالا	زاویه‌ی تحریک در پرسپکس (درجه)	سرعت گروه (m/s)
A ₁	۶۰	۳۱۰۴
S ₁	۵۸	۳۰۳۲
A ₂	۵۶	۲۹۲۶
S ₂	۵۳	۲۸۰۰
A ₃	۴۹	۲۶۲۶

۲-۸-۱- سرعت موج HOMC

سرعت موج HOMC از سرعت گروه مدهای موجود در این موج متفاوت است. علت این امر آن است که موج HOMC حاصل از تداخل سازنده^۱ی مدهای مختلف با سرعت گروه نزدیک به هم است. سرعت موج HOMC از طریق آزمایش تعیین می‌شود. در واقع ممکن است که زاویه‌ی ایجاد موج HOMC با زاویه‌ی تحریک یک مد یکسان باشد اما سرعت موج HOMC با سرعت گروه مد موردنظر متفاوت باشد، چرا که ماهیت موج HOMC با ماهیت یک مد منفرد متفاوت است [۲۹].

¹ Constructive interference

۲-۹- مروری بر تحقیقات پیشین موج لمب

پس از شناسایی ویژگی‌های موج لمب و کاربرد آن در ارزیابی غیرمخرب، محققان بسیاری به شناسایی عیوب توسط امواج لمب پرداختند. یکی از مسائل مهم در تحقیقات، انتخاب مد و شرایط مناسب آزمایش بود، چرا که به علت خاصیت پاشندگی در امواج لمب، در صورت عدم ایجاد شرایط مناسب برای انجام آزمایش، چندین مد با هم ایجاد می‌شود که موجب پیچیدگی تفسیر نتایج خواهد شد. از دیگر مواردی که در تحقیقات اولیه مورد بررسی قرار گرفت، توانایی انتشار امواج لمب در مسافت‌های طولانی بود. این امر باعث شد تا موج لمب جایگزین بازرسی نقطه به نقطه توسط سایر موج‌ها شود و از این طریق بخش وسیعی از قطعه مورد بازرسی قرار گیرد و سرعت بازرسی افزایش یابد. یکی از اولین پایه‌گذاران استفاده از موج لمب در ارزیابی غیر مخرب ورتون^۱ بود. این محقق با انتشار مقاله‌ای در این زمینه تا حد زیادی به ایجاد درک صحیحی از کاربرد موج لمب در شناسایی عیوب و بازرسی قطعات کمک کرد [۳۰]. با این حال بسیاری ویکترو^۲ [۳۱] را به‌عنوان فرد تأثیرگذار در حیطه‌ی بازرسی با استفاده از موج لمب می‌شناسند، چرا که او با انتشار کتابی در زمینه‌ی انتشار امواج لمب، بسیاری از مسائل مربوط به این حیطه را روشن کرد. به همین دلیل با وجود گذشت زمان، این کتاب همواره یکی از منابع اصلی شناسایی امواج لمب شناخته می‌شود. آلین^۳ یکی از اولین محققانی است که به‌صورت جامع و علمی تأثیر عیوب بر امواج لمب را بررسی کرد. بسیاری از تحقیقات قبل از او در زمینه‌ی شناسایی عیوب به‌صورت موردی و برای موارد خاص از جمله قطعات جوشکاری شده بود. مقاله‌ی این محقق مربوط به بررسی تأثیر یک عیب بر گسترش امواج لمب بود. در این تحقیق دو نوع عیب مستطیلی و متوازی‌الاضلاع مورد بررسی قرار گرفت. یکی از نوآوری‌های ارائه شده در این تحقیق ابداع روش 2D FFT بود. با استفاده از این روش امکان تفکیک مدها و استخراج دامنه‌ی مدها فراهم می‌شود. در این حالت نموداری بین دو پارامتر فرکانس و عدد موج رسم می‌شود و مشخص می‌شود در یک فرکانس چه مدهایی ایجاد می‌شوند. این تحقیق در ابتدا به روش المان محدود انجام شد و سپس به شیوه‌ی تجربی تصدیق شد. یکی از نوآوری‌های این مقاله استفاده از روش انتشار موج در زیر آب برای تولید امواج لمب بود. در این حالت با توجه به اینکه نشت انرژی زیادی ناشی از تماس کل قطعه با سیال به وجود می‌آید، نگهدارنده‌ی خاصی جهت به حداقل رساندن تماس قطعه با سیال ابداع شد تا

¹ Worlton

² Viktorov

³ Alleyne

فقط در نقاط ارسال و دریافت موج، تماس با سیال برقرار شود. به این صورت علاوه بر بهره‌مندی از ویژگی‌های آزمایش در زیر آب از جمله تکرارپذیری، از نشت انرژی نیز جلوگیری شد. هدف این مقاله بررسی شناسایی حساسیت مدهای موج لمب در شناسایی شیپار بود. بر اساس نتایج به‌دست آمده، حساسیت امواج لمب در شناسایی شیپار به عواملی از جمله فرکانس، ضخامت، نوع مد (مقارن یا نامقارن)، مرتبه‌ی مد و هندسه‌ی شیپار وابسته است. برای شناسایی شیپار باید نسبت طول موج به عمق شیپار از مرتبه ۴۰ باشد ($\frac{\lambda}{a} = 40$). همچنین در صورتی که پهنا‌ی شیپار در مقابل طول موج کوچک باشد، دامنه‌ی موج عبوری و بازتابی به تغییرات پهنا حساس نیست و عامل اصلی تأثیرگذار عمق شیپار است. بر اساس پیشنهادهای ارائه شده در این مقاله بررسی تغییرات نسبت عبور و بازتاب به ابعاد عیب، یکی از روشهای شناسایی مشخصات عیب است [۲۳].

حساسیت مدهای موج لمب نسبت به عیوب مختلف، متفاوت است. برای انتخاب مد مناسب برای بازرسی یک عیب خاص می‌توان از توزیع مولفه‌های تنش مدهای موج لمب بهره برد. در این راستا تأثیر عیب بر هر یک از مولفه‌های تنش که بیشتر باشد، این مولفه معیار قرار گرفته و حساسیت مد موردنظر به عیب با توجه به آن بررسی می‌شود. به‌عنوان مثال جهت بررسی عیب عمودی شکل در یک ورق، هر چه مقدار مولفه‌ی تنش نرمال بیشتر باشد، حساسیت مد به این عیب بیشتر خواهد بود. همچنین حساسیت مدهای مقارن نسبت به مدهای نامقارن برای بازرسی عیوب افقی در ورق بیشتر است [۳۲]. علاوه بر توزیع تنش، فرکانس تحریک نیز بر حساسیت موج نسبت به عیب تأثیرگذار است. در یک بررسی نشان داده شد که حساسیت مد S_0 نسبت به ترک با عمق‌های مختلف در ورق با افزایش فرکانس-ضخامت در بازه‌ی 0.05-1.4 MHz-mm، به طور غیرخطی افزایش می‌یابد [۳۳]. دما^۱ و همکارانش نشان دادند که ضریب بازتابش مد $T(0,1)$ نسبت به عیوب ترک و شیپار در لوله با افزایش فرکانس در بازه‌ی 10-300 kHz افزایش می‌یابد [۳۴]. مرتبه‌ی مد نیز بر حساسیت مد نسبت به عیب تأثیرگذار است و مدهای مرتبه بالا مانند S_1 ، نسبت به مدهای S_0 و A_0 برای یافتن عیوب ساختاری ریز مناسب‌تر هستند [۴]. پژوهش‌های متعددی در زمینه‌ی شناسایی عیوب با استفاده از موج لمب انجام شده است [۳۷-۳۵]. در جدول ۲-۲ برخی از تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی شناسایی عیوب مختلف با استفاده از موج لمب آورده شده است.

¹ Demma

جدول ۲-۲- برخی از پژوهش‌های پیشین در زمینه‌ی شناسایی عیوب با استفاده از موج لمب

سال انتشار	روش تحقیق	نوع عیب	موضوع تحقیق
۲۰۱۵	تجربی و تحلیلی	ترک	تعیین موقعیت ترک در ورق با استفاده از موج لمب و ارائه‌ی یک الگوریتم جدید [۳۸]
۲۰۱۵	تجربی و المان محدود	عیوب داخلی	مشخصه‌یابی عیوب داخلی ورق آلومینیومی با استفاده از تداخلات میدان نزدیک ^۱ موج S ₀ و عیب [۳۹]
۲۰۱۶	تجربی و المان محدود	ترک	بررسی و موقعیت‌یابی ترک در تیر آلومینیومی با استفاده از برهم‌کنش غیرخطی موج لمب و ترک [۴۰]
۲۰۱۶	تجربی و تحلیلی	ترک	تعیین اندازه ترک با استفاده از روش بیزی ^۲ در ورق [۴۱]
۲۰۱۶	تحلیلی و المان محدود	ترک اطراف سوراخ پرچ	بررسی ترک اطراف سوراخ پرچ در ورق با استفاده از راه حل تحلیلی فرم بسته ^۳ [۴۲]
۲۰۱۷	تجربی و المان محدود	عیب داخلی	موقعیت‌یابی و اندازه‌گیری عیوب داخلی در تیر فولادی [۴۳]
۲۰۱۷	تجربی و المان محدود	آسیب خستگی	بررسی آسیب خستگی در ورق با استفاده از موج لمب غیرخطی [۴۴]
۲۰۱۷	تجربی و المان محدود	جدایش بین لایه‌ای	موقعیت‌یابی جدایش بین لایه‌ای در تیر کامپوزیتی با استفاده از موج لمب غیرخطی [۴۵]
۲۰۱۸	تجربی و المان محدود	جدایش اتصال چسبی	بررسی جدایش در اتصال چسبی تک لبه‌ای با استفاده از موج لمب در فرکانس‌های مختلف و ارائه‌ی بهترین فرکانس بازرسی [۴۶]
۲۰۱۸	تجربی و المان محدود	تغییر شکل موضعی در اثر خزش	ارزیابی تغییر شکل موضعی در اثر خزش در فولاد اصلاح شده با استفاده از روش اختلاط موج لمب غیرخطی ^۴ [۴۷]
۲۰۱۸	تجربی	آسیب در اتصال چسبی	بررسی آسیب در اتصال چسبی تک لبه‌ای در سازه‌ی فلزی با استفاده از موج لمب [۴۸]
۲۰۱۹	تجربی و المان محدود	عیب دایره‌ای شکل	ارائه‌ی یک روش جدید جهت تعیین موقعیت و اندازه عیب دایره‌ای شکل در ورق آلومینیومی با استفاده از موج لمب [۴۹]

¹ Near-field interaction² Bayesian method³ Closed-form analytical solution⁴ Nonlinear Lamb wave mixing technique

۲۰۱۹	تجربی و المان محدود	ترک	تعیین اندازه، شکل و جهت ترک با استفاده بر پایه‌ی روش تصویربرداری ^۱ با استفاده از موج لمب [۵۰]
۲۰۲۰	تجربی و المان محدود	جدایش بین لایه‌ای	ارائه‌ی یک روش جدید بر پایه روش بیضی جهت شناسایی جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌ها با استفاده از موج لمب [۵۱]
۲۰۲۰	تجربی	میکروترک	شناسایی میکروترک در ورق آلومینیومی با استفاده از موج لمب غیرخطی [۵۲]
۲۰۲۱	تجربی و المان محدود	ترک	توسعه یک مدل کمی برای تعیین جهت و اندازه ترک با استفاده از ویژگی‌های دامنه و تغییر فاز موج لمب [۵۳]
۲۰۲۱	تجربی و المان محدود	میکروترک خستگی	شناسایی میکرو ترک خستگی در سازه‌های ورقی با استفاده از روش اختلاط موج لمب غیرخطی [۵۴]
۲۰۲۱	تجربی	خوردگی	بررسی خوردگی سطحی با استفاده از با استفاده از روش موج لمب غیر خطی و تحریک مد S_0 و ترکیب مدهای S_0-A_0 [۵۵]
۲۰۲۱	تجربی و المان محدود	اتصال جوشی	بررسی برهم‌کنش مدهای S_0 و A_0 با اتصال جوشی و ارزیابی تأثیر زاویه‌ی ارسال بر بازتابش، عبور و تغییر حالت موج [۵۶]

۲-۱۰-۲- مروری بر تحقیقات پیشین موج HOMC

ستیارناریان^۲ و همکارانش برای اولین بار در سال ۲۰۰۸ انتشار امواج HOMC در امتداد محیط استوانه‌ی توخالی و اثر متقابل این موج با عیوب موجود در ناحیه‌ی تکیه‌گاهی لوله را بررسی کردند. آنها انتشار این امواج هدایت‌شده‌ی محیطی در لوله‌ی ساخته شده از فولاد نرم^۳ که روی آن تعدادی شیار محوری مصنوعی و سوراخ (شبه‌سازی عیب خوردگی) ایجاد شده بود، را بررسی کردند. در این تحقیق با استفاده از زمان پرواز^۴ موقعیت عیوب تعیین شد. همچنین اندازه‌ی عیب‌ها نیز با استفاده از دامنه‌ی سیگنال تخمین زده شد. همچنین نشان داده شد که خاصیت پاشندگی امواج HOMC کم است و این امواج قابلیت شناسایی عیوب کوچک در سطح مقطع لوله را دارند [۲۷]. آنها همچنین در تحقیقی دیگر با استفاده از امواج هدایت‌شده

¹ Imaging method

² Satyarnarayan

³ Mild steel (MS)

⁴ Time-of-flight

مدهای مرتبه بالای پاشنده^۱ و امواج هدایت شده خوشه مدهای مرتبه بالای ناپاشنده^۲ به شناسایی و اندازه‌گیری عیوب زنگ‌زدگی در لوله‌ها و مخازن پرداختند. در این بررسی، عیوب به شکل سوراخ و نازک‌شدگی دیواره‌ها به طور مصنوعی در لوله و مخزن ایجاد و بررسی شدند [۵۷]. جایارمن^۳ و همکارانش در سال ۲۰۰۹ گزارشی درباره‌ی وجود امواج HOMC که در مسیر انتشار ناپاشنده هستند، ارائه کردند. آنها برای درک روش تولید، انتشار و مشخصه‌های پاشندگی این امواج چندین مدل‌سازی دوبعدی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام دادند. آزمایش‌ها نیز بر روی ورق آلومینیومی با ابعاد 2ft×3ft×8mm و با استفاده از تراگذار با فرکانس 2.25 MHz و قطر 1 in که بر روی کفشک اکریلیکی تعبیه شده بود، انجام شدند [۳]. آنها همچنین در تحقیقی دیگر با استفاده از امواج HOMC، عیوبی به شکل سوراخ و با قطرهای مختلف را در لوله فولادی بررسی کردند. آنها همچنین، با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود، زاویه‌ی بهینه‌ی تولید موج HOMC را به دست آوردند [۵۸]. چاندرسکرن^۴ و همکارانش با استفاده از امواج HOMC زنگ‌زدگی در مخازن ذخیره‌سازی سوخت را بررسی کردند؛ چرا که بررسی نواحی بین دیواره و کف مخزن با استفاده از روش‌های مرسوم، به علت وجود روکش و ناهمواری سطح و دشواری دسترسی، امکان‌پذیر نیست. با استفاده از امواج HOMC می‌توان در حین استفاده از مخزن آن را بازرسی کرد [۲۹]. در سال ۲۰۱۱ سوامیتن^۵ و همکارانش با استفاده از امواج HOMC خوردگی در تکیه‌گاه لوله‌ها را بررسی کردند. استفاده از روش‌های مرسوم بازرسی تکیه‌گاه‌ها کار دشواری است؛ اما آنها با استفاده از امواج HOMC و سیستم‌های پوشش نیمه خودکار قابل حمل، سرعت و دقت بررسی عیوب در خط لوله را بالا بردند [۵۹]. علاوه بر این، آنها در تحقیقی دیگر تأثیر انحنای لوله بر پراکندگی^۶ امواج HOMC را با شبیه‌سازی عددی بررسی کردند و نشان دادند که امواج محیطی HOMC در عبور از قسمتی از سطح مقطع لوله که در اثر وجود جوش تغییر می‌کند، بازتابشی ندارد؛ اما در ورق با همان تغییر سطح مقطع، بازتابش موج قابل توجه است [۶۰]. راتنم^۷ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ روش جدیدی برای تولید امواج HOMC با استفاده از تراگذارهای EMAT در ورق ارائه کردند. آنها

¹ Dispersive Higher Order Modes Guided Waves (HOM-GW)

² Non-dispersive Higher Order Modes Cluster Guided Waves (HOMC-GW)

³ Jayaraman

⁴ Chandrasekaran

⁵ Swaminathan

⁶ Scattering

⁷ Ratnam

آزمایش‌های خود را بر روی ورق آلومینیومی با ضخامت‌های مختلف و با سه نوع تراگذار EMAT انجام دادند و عیوب ایجاد شده روی ورق آلومینیومی را با استفاده از تراگذارهای EMAT و امواج HOMC بررسی کردند. همچنین، برای درک بهتر روش تولید امواج HOMC با استفاده از این تراگذارها، مدل‌های اجزای محدود دوبعدی با حاصل ضرب فرکانس-ضخامت‌های مختلف را ایجاد کردند [۲۸]. خلیلی و کاوولی^۱ در سال ۲۰۱۶ نشان دادند که می‌توان در مقادیر فرکانس-ضخامت حدود 20 MHz.mm مد منفرد موج لمب را با پاشندگی کم تولید کرد. آنها با استفاده از آزمایش و شبیه‌سازی عددی، مد A₁ را در بازه‌ی فرکانسی که مدهای بسیاری دارای سرعت فاز یکسان هستند، تولید کردند. مد A₁ به علت جابه‌جایی نسبتاً کمی که در سطح ورق دارد، بازتابش کمی در قطعاتی مانند اتصال تی^۲ دارد. آنها همچنین نشان دادند که رفتار مد A₁ در بازه‌ی فرکانسی مورد نظر بسیار نزدیک به رفتار امواج HOMC است [۶۱]. راجاگپال^۳ و همکارانش در سال ۲۰۱۷ حساسیت امواج HOMC نسبت به عیوب شیار مانند را با محاسبه ضریب بازتابش^۴ موج بررسی کردند. آنها در این تحقیق از دو روش تجربی و عددی استفاده و تأثیر متقابل موج و عیب را بررسی کردند [۲۶]. زنگ^۵ و همکارانش با استفاده از موج لمب در بازه‌ی فرکانس-ضخامت بالا، توانستند خوردگی در ورق آلومینیومی را به‌صورت آزمایشگاهی و با استفاده از لیزر بررسی کنند [۶۲].

۱۱-۲- جمع‌بندی

در این فصل تئوری و اصول کلی حاکم بر موج لمب ارائه شد. در ادامه موج HOMC، ویژگی‌های اصلی و روش تحریک آن ارائه شد. در انتهای فصل به مرور تحقیقات پیشین در زمینه‌ی موج لمب و موج HOMC پرداخته شد. با توجه به اینکه تحقیقات محدودی در زمینه‌ی موج HOMC انجام شده است، ویژگی‌های این موج به‌طور کامل شناسایی نشده است و نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه است. به‌طور مثال، تاکنون مدهای موجود در موج HOMC، دامنه‌ی این مدها و تأثیر آن بر ویژگی موج HOMC بررسی نشده است. با وجود اینکه در تحقیقات پیشین بازه‌ی فرکانس-ضخامت تحریک موج HOMC مشخص است، اما تأثیر فرکانس تحریک بر موج

¹ Cawley

² T-joint

³ Rajagopal

⁴ Reflection coefficient

⁵ Zeng

HOMC بررسی نشده است؛ همچنین مطالعه‌ای در زمینه‌ی تأثیر فرکانس-ضخامت تحریک بر حساسیت موج HOMC نسبت به عیوب انجام نشده است. از این رو به تحقیقات بیشتری در زمینه‌ی موج HOMC جهت شناسایی هر چه بیشتر این موج نیاز است.

فصل سوم

آزمایش‌های تجربی

۳-۱- مقدمه

در این فصل، تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده و روش انجام آزمایش‌ها بررسی می‌شود. ابتدا به معرفی تجهیزات آزمایشگاهی و روش تحریک موج HOMC در ورق پرداخته می‌شود. در ادامه طراحی و ساخت کفشک‌های مخروطی ناقص و زاویه‌ای برای تحریک موج لمب تشریح می‌شود.

۳-۲- تحریک موج HOMC در ورق

در این قسمت، با استفاده از کاوند زاویه‌ای، موج HOMC در ورق تحریک می‌شود. هدف از انجام این آزمایش‌ها، تحریک موج HOMC در فرکانس-ضخامت‌های مختلف و شناسایی عیب ترک سطحی با عمق‌های متفاوت در ورق است. در ادامه تجهیزات مورد استفاده و نمونه‌ی آزمایش شرح داده می‌شود.

۳-۳- تجهیزات آزمایشگاهی

در این بخش به بررسی تجهیزات مورد استفاده در آزمون فراصوتی و تنظیمات آنها جهت انجام آزمایش پرداخته می‌شود.

۳-۳-۱- دستگاه فرستنده/گیرنده^۱

این سیستم از دو بخش فرستنده و گیرنده تشکیل شده است. بخش فرستنده، وظیفه‌ی تولید پالس الکتریکی و کنترل انرژی پالس ارسالی را بر عهده دارد. در بخش گیرنده سیگنال‌های تراگذار دریافت و یکسوسازی می‌شوند. این بخش توانایی تقویت و فیلترینگ سیگنال را نیز دارد. در این آزمایش از دستگاه‌های فرستنده/گیرنده فراصوتی^۲ USB-UT350 و Panametrics 5070PR استفاده شده است. در دستگاه USB-UT350 موج تحریک به صورت پالس تک فرکانس کوتاه^۳ است و دستگاه توانایی تغییر فرکانس در بازه فرکانسی

¹ Pulser- receiver

² Ultrasonic Pulser/Receiver

³ Tone-burst signal

کاوند را دارد. در دستگاه Panametrics 5070PR موج تحریک به صورت نیزه‌ای^۱ است و این دستگاه کاوند را در فرکانس مرکزی تحریک می‌کند. تصاویر دستگاه‌های فرستنده/گیرنده در شکل ۳-۱ نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۱- دستگاه فرستنده/گیرنده‌ی فراصوتی (الف) USB-UT350 (ب) Panametrics 5070PR

۳-۳-۲- تراگذار فراصوتی

در این تحقیق از تراگذار پیزوالکتریک و زاویه متغیر 2 MHz استفاده شده است (شکل ۳-۲). ابعاد کریستال تراگذار 10 mm × 12 mm است. طیف فرکانسی این تراگذار در شکل ۳-۳ نشان داده شده است و بر اساس آن، فرکانس مرکزی کاوند 1.96 MHz است.

پیش از استفاده از کاوند، باید واسنجی کاوند جهت تعیین محل خروج موج از کاوند (شاخص کاوند^۲) و اطمینان از صحت زاویه‌ی ارسال موج انجام شود. جهت واسنجی کاوند از بلوک واسنجی V1 استفاده شده است. برای تعیین محل خروج موج، کاوند زاویه متغیر مطابق شکل ۳-۴ (الف) بر روی بلوک V1 قرار داده می‌شود. با جابه‌جایی کاوند در راستای پیکان نشان‌داده‌شده در شکل، در جایی که موج بازتابی از لبه‌ی انحنا دار بلوک، بیشترین دامنه را دارد کاوند را ثابت نگاه داشته و نقطه‌ای از کاوند که در راستای نقطه‌ی O روی بلوک است به‌عنوان محل خروج موج از کاوند مشخص می‌شود. همچنین برای تعیین زاویه‌ی ارسال موج، مطابق شکل ۳-۴ (ب) کاوند روی بلوک واسنجی قرار داده شده و با جابه‌جایی در راستای پیکان نشان‌داده‌شده در شکل، دامنه

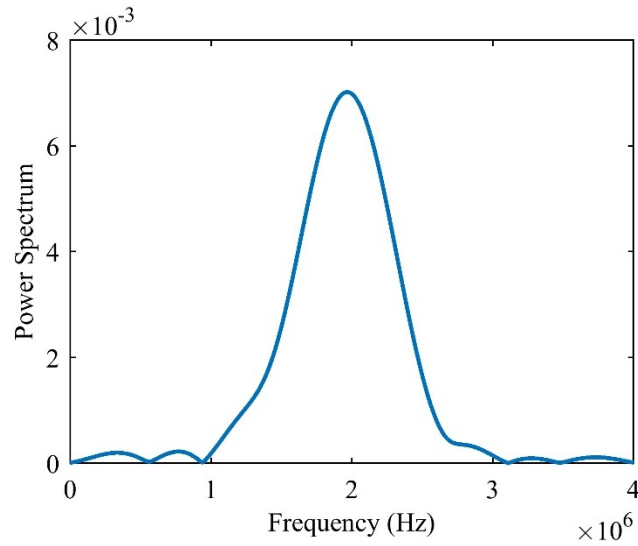
¹ Spike

² Probe index

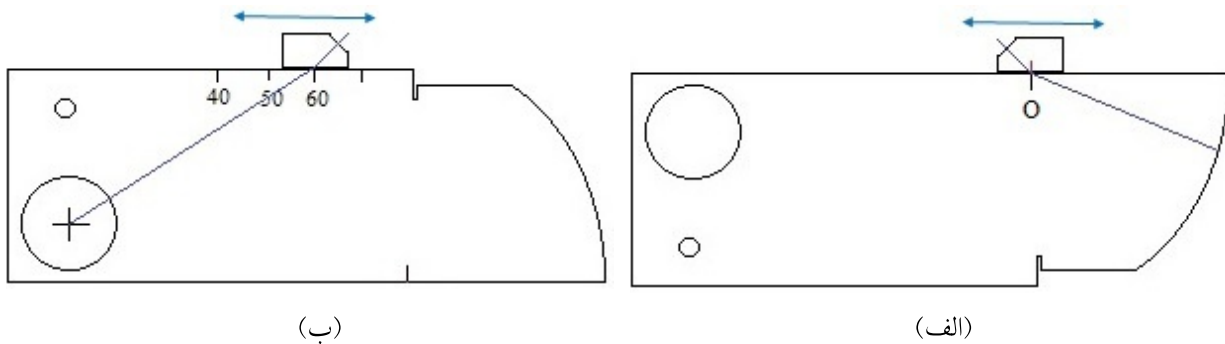
موج بازتابی از ناحیه‌ی پرسپکس بلوک بررسی می‌شود. در جایی که دامنه‌ی بیشینه حاصل می‌شود، عدد مقابل شاخص کاوند بیانگر زاویه‌ی ارسال موج است.



شکل ۳-۲- کاوند زاویه متغیر 2 MHz



شکل ۳-۳- طیف فرکانسی کاوند زاویه متغیر 2 MHz



شکل ۳-۴- طرح‌واره‌ی فرایند واسنجی کاوند با استفاده از بلوک VI الف) بررسی محل خروج موج ب) بررسی زاویه موج

۳-۳-۳- کابل

کابل برای اتصال تراگذار به دستگاه فرستنده- گیرنده استفاده می‌شود. در این آزمایش از کابل یک سر Lemo-00 و یک سر BNC برای اتصال کاوند به دستگاه فرستنده- گیرنده استفاده شده است.

۳-۳-۴- کارت مبدل آنالوگ به دیجیتال

این کارت، سیگنال‌های الکتریکی آنالوگ را به دیجیتال تبدیل می‌کند. طی این فرایند کاهش داده صورت می‌گیرد. این کاهش داده‌ها یکی از عوامل خطا در آزمون‌های فراصوتی است ولی بدون این فرایند امکان ورود سیگنال به واحد پردازنده وجود ندارد. از مشخصات مهم این کارت حداکثر نرخ نمونه‌برداری^۱ یا فرکانس نمونه‌برداری است. نرخ نمونه‌برداری کارت مبدل آنالوگ به دیجیتال صد میلیون نمونه بر ثانیه است.

۳-۳-۵- واحد پردازنده

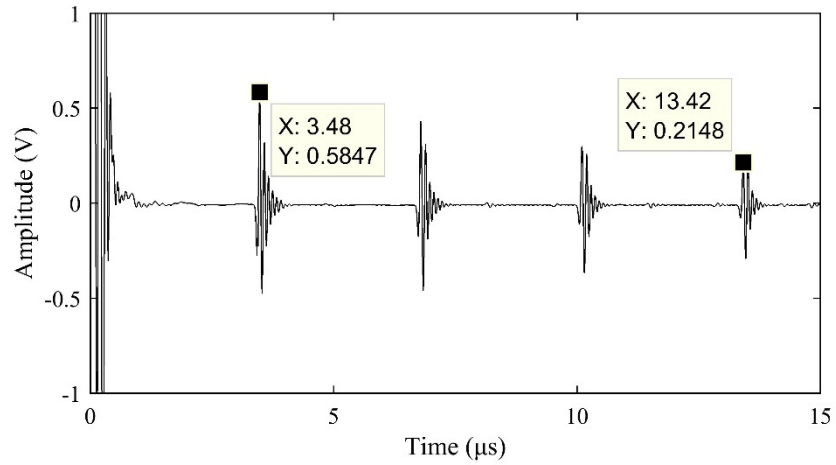
این واحد معمولاً یک رایانه است که علاوه بر کنترل کل بخش‌های سیستم، آخرین بخش سیستم اندازه‌گیری است که می‌توان با کمک آن از سیگنال‌های دیجیتال به خروجی موردنظر رسید.

۳-۴- نمونه‌های آزمایش

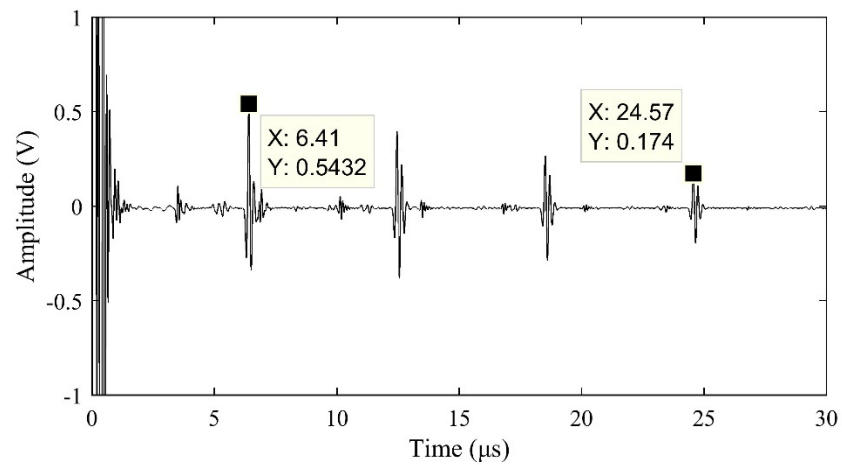
در این تحقیق از دو ورق فولادی با ابعاد $1000\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ استفاده شده است. روی هر ورق دو ترک سطحی با استفاده از روش ماشینکاری تخلیه الکتریکی^۲ با طول 10 mm ، عرض 2 mm و عمق‌های 0.5 ، 1 ، 3 و 5 میلی‌متر ایجاد شده است. در ادامه عمق ترک‌های سطحی نسبت به ضخامت ورق و به صورت 5% ، 10% ، 30% و 50% ذکر می‌شود. برای جلوگیری از تداخل پژواک بازتابی از ترک‌های سطحی و لبه‌ی ورق، ترک‌های سطحی تا حد امکان با فاصله‌ی دور از یکدیگر و لبه‌های ورق ایجاد شده‌اند و فاصله‌ی ترک‌های سطحی تا لبه‌ی پشتی ورق 100 mm است.

¹ Sampling rate

² Electrical discharge machining (EDM)



(الف)



(ب)

شکل ۳-۵- سیگنال حاصل از ارسال (الف) موج طولی (ب) موج عرضی در ورق فولادی

چگالی ورق 7850 kg/m^3 است. با داشتن چگالی ورق و سرعت موج طولی و عرضی در ورق می‌توان

از روابط ۳-۱ و ۳-۲ به ترتیب برای تعیین مدول الاستیسیته و ضریب پواسون ورق استفاده کرد [۴].

$$E = \frac{\rho c_s^2 \left[3 \left(\frac{c_l}{c_s} \right)^2 - 4 \right]}{\left(\frac{c_l}{c_s} \right)^2 - 1} \quad ۱-۳$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{c_l}{c_s} \right)^2 - 2}{2 \left[\left(\frac{c_l}{c_s} \right)^2 - 1 \right]} \quad ۲-۳$$

در روابط فوق، E مدول الاستیسیته، ρ چگالی، c_s سرعت موج عرضی، c_l سرعت موج طولی و ν ضریب پواسون ورق است. برای تعیین سرعت موج طولی و عرضی به ترتیب از کاوندهای نرمال طولی و عرضی استفاده شد. با استفاده از کاوند نرمال طولی مدل V537 ساخت شرکت پانامتریکس با فرکانس مرکزی 10 MHz و قطر بلورهی 0.25 in موج طولی به ورق فولادی ارسال شد. در شکل ۳-۵ (الف) سیگنال به دست آمده از ارسال موج طولی نشان داده شده است. برای به دست آوردن سرعت موج عرضی در ورق فولادی از کاوند نرمال عرضی با فرکانس مرکزی 2 MHz و قطر بلورهی 0.5 in استفاده شد. در هر دو آزمایش از دستگاه فرستنده/گیرنده Panametrics 5070PR استفاده شد. نرخ نمونه برداری در آزمایش‌ها 100 MS/s بوده و سیگنال به دست آمده حاصل از میانگین‌گیری ۱۰۰ سیگنال ارسالی است. در شکل ۳-۵ (ب) سیگنال حاصل از ارسال موج عرضی در ورق نشان داده شده است. با توجه به اینکه آزمایش‌ها به صورت بازتابی^۱ انجام شده و ضخامت ورق 10 mm است، سرعت موج طولی و عرضی در ورق به ترتیب 6036.2 m/s و 3303.9 m/s به دست می‌آید. با قرار دادن این مقادیر در روابط ۱-۳ و ۲-۳ مدول الاستیسیته و ضریب پواسون به ترتیب برابر با 220.4 GPa و 0.3 به دست می‌آید. در شکل ۳-۶ نمایی از تحریک موج HOMC در ورق با استفاده از کاوند زاویه متغیر نشان داده شده است.

^۱ Pulse-echo



شکل ۳-۶- آزمایش تحریک موج HOMO در ورق

۳-۵- تعیین زاویه‌ی ارسال موج HOMO

با توجه به منحنی پاشندگی موج لمب، در یک فرکانس-ضخامت معین، امکان تحریک بیش از دو مد وجود دارد. در روش ارسال زاویه‌ای برای تحریک مد خالص باید زاویه‌ی ارسال موج به ورق را متناسب با زاویه‌ی تحریک مد موردنظر انتخاب کرد. موج ارسالی توسط کاوند پیزوالکتریک دارای طول موج λ_c در ماده واسط است (ماده‌ی واسط در روش غوطه‌وری آب و در روش تماسی پلکسی گلاس یا هر ماده دیگری باشد). مطابق شکل ۳-۷ و بر اساس اصل انطباق^۱، رابطه ۳-۳ برقرار است [۶۳].

$$\lambda_p = \frac{\lambda_c}{\sin \theta_{inc}} \quad ۳-۳$$

$$\lambda_c = \frac{c_{plexiglass}^l}{f} \quad ۴-۳$$

$$\lambda_p = \frac{c_{plate}^{ph}}{f} \quad ۵-۳$$

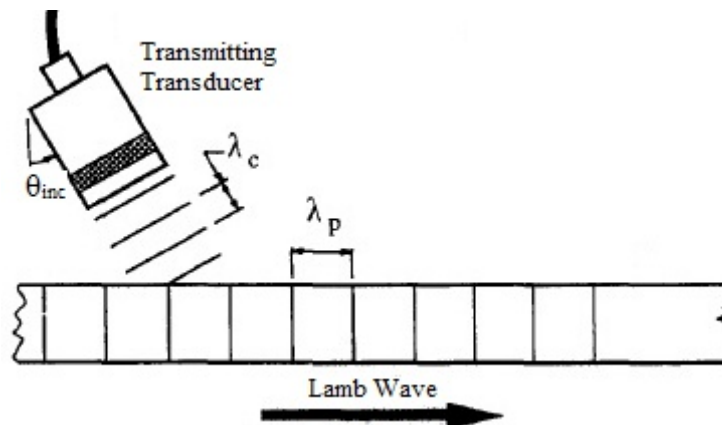
λ_p طول موج ارسالی در ورق، $c_{plexiglass}^l$ سرعت موج طولی در ماده‌ی واسط (در اینجا کفشک پلکسی گلاس)، c_{plate}^{ph} سرعت فاز مد موردنظر در ورق و f فرکانس تحریک است. با جایگذاری روابط ۳-۴ و ۳-۵ در رابطه ۳-۶ زاویه ارسال موج به‌صورت زیر به‌دست می‌آید [۶۳].

^۱ Coincidence principle

$$\theta_{inc} = \sin^{-1} \frac{c_{plexiglass}^l}{c_{plate}^{ph}}$$

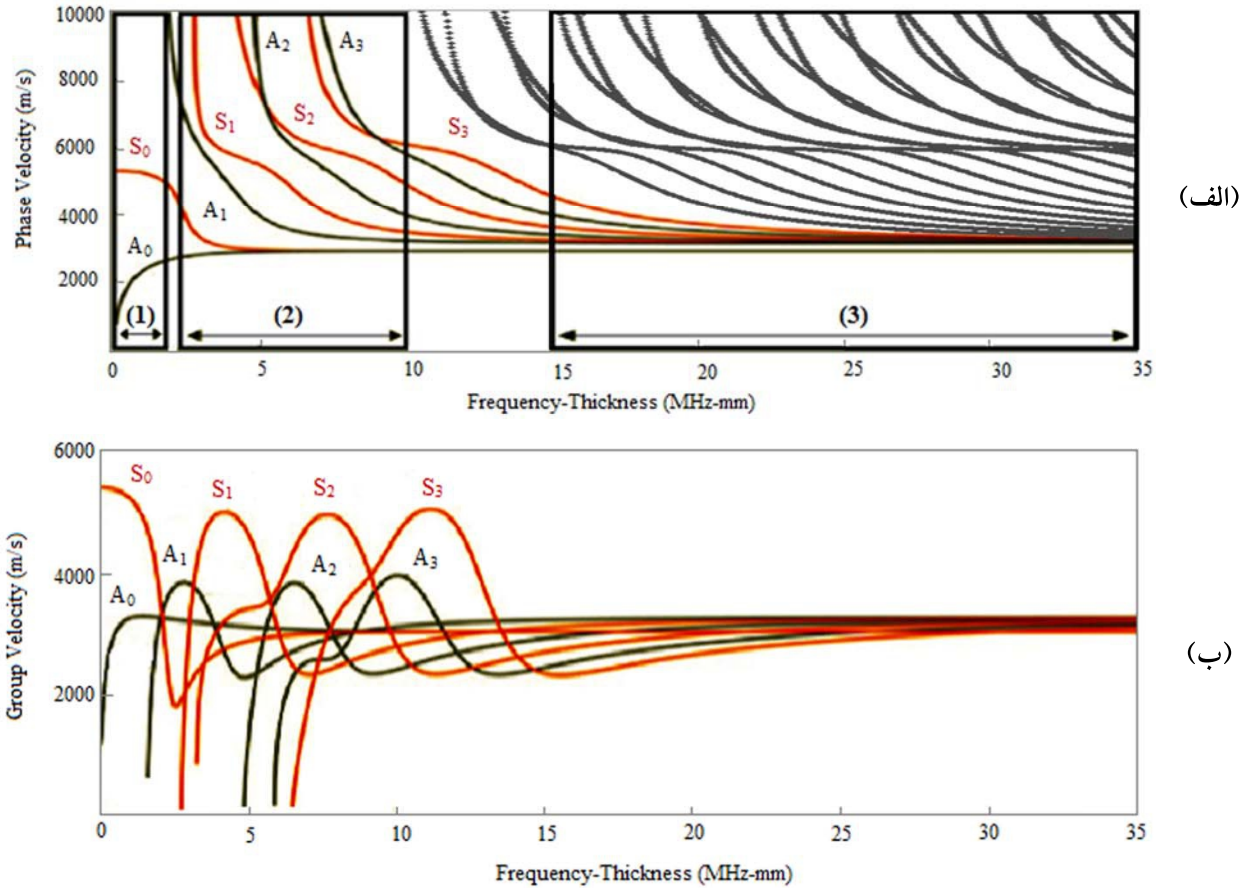
۶-۳

سرعت فاز هر مد با استفاده از منحنی پاشندگی موج لمب در محدوده‌ی فرکانسی موردنظر به دست می‌آید. منحنی پاشندگی معمولاً از حل عددی رابطه‌ی پاشندگی به دست می‌آید. با استفاده از روش اجزای محدود شبه تئوری^۱ نیز می‌توان منحنی پاشندگی را رسم کرد. نرم‌افزار GUIGUW با استفاده از این روش منحنی پاشندگی را رسم می‌کند [۶۴]. منحنی پاشندگی موج لمب برای ورق فولادی موردنظر در شکل ۳-۸ نشان داده شده است. ناحیه‌ی (۱) در منحنی پاشندگی سرعت فاز (شکل ۳-۸ الف)) تنها شامل مدهای A_0 و S_0 است و به دلیل اختلاف سرعت فاز این مدها امکان تحریک هر یک به‌طور مجزا در این ناحیه‌ی فرکانسی وجود دارد. ناحیه‌ی (۲) شامل مدهای مرتبه بالاتر با خاصیت پاشندگی بیشتر است. در ناحیه‌ی (۳) سرعت فاز برخی از مدهای مرتبه بالا همگرا شده و امکان تحریک همزمان این مدها وجود دارد. با توجه به شکل ۳-۸ ب) سرعت گروه این مدها در فرکانس-ضخامت 15-35 MHz-mm نیز همگرا شده و این مدها به‌صورت یک خوشه مد در ورق منتشر می‌شوند.



شکل ۳-۷- طرح‌واره‌ی تحریک موج لمب با استفاده از کاوند زاویه‌ای [۶۳]

¹ Semi Analytical Finite Element Method (SAFE)



شکل ۳-۸- منحنی پاشندگی ورق فولادی الف) سرعت فاز ب) سرعت گروه

با استفاده از منحنی پاشندگی شکل ۳-۸ سرعت فاز، زاویه‌ی تحریک و سرعت گروه مدهای مرتبه بالا در فرکانس-ضخامت 20 MHz-mm به صورت جدول ۳-۱ به دست می‌آید. سرعت موج طولی در کفشک پلکسی‌گلاس، برای محاسبه‌ی زاویه‌ی تحریک، 2730 m/s است. با استفاده از سعی و خطا به روش تجربی و شبیه‌سازی بین زوایای جدول ۳-۱، زاویه‌ی تحریک موج HOMC، 52° به دست آمد.

جدول ۳-۱- سرعت فاز، زاویه‌ی تحریک و سرعت گروه مدهای موج لمب در ورق فولادی در 20 MHz-mm

مد	سرعت فاز (m/s)	زاویه‌ی تحریک (درجه)	سرعت گروه (m/s)
A ₁	3315	55.4	3276
S ₁	3366	54.2	3211
A ₂	3452	52.3	3112
S ₂	3579	49.7	3058
A ₃	3761	46.5	3052
S ₃	4017	42.8	2983

۳-۶- تحریک موج لمب با استفاده از کفشک مخروطی ناقص

در این تحقیق از کفشک مخروطی ناقص که برای اولین بار در آزمایشگاه ارزیابی غیرمخرب دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی طراحی شده است [۴۹، ۶۵]، برای تحریک موج لمب استفاده می‌شود. کاوند روی سطح بزرگ مخروط ناقص قرار می‌گیرد و موج فراصوتی ارسالی از کاوند با دیواره‌ی کفشک برخورد کرده و سپس با زاویه‌ی معینی وارد ورق شده و مد مشخصی از موج لمب را تحریک می‌کند.

طبق قانون اسنل^۱، موج فراصوتی در برخورد زاویه‌دار با سطح مشترک دو محیط، به موج طولی و عرضی تبدیل می‌شود. کاوندهای زاویه‌ای بر مبنای قانون اسنل طراحی شده‌اند. برای طراحی کاوند با کفشک مخروطی ناقص نیز از این قانون استفاده می‌شود. در شکل ۳-۹ طرح‌واره‌ی طراحی این کفشک نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، موج در برخورد با سطح جانبی کفشک دچار شکست و تغییر حالت شده و موج‌های طولی و عرضی ایجاد می‌شوند. زوایای شکست موج‌های طولی و عرضی به ترتیب با θ_L و θ_S در شکل ۳-۹ نشان داده شده است. هر یک از این موج‌ها می‌توانند به سطح جانبی یا زیرین کفشک برخورد کنند. اگر سطح زیرین کفشک کوچک باشد، موج‌های طولی و عرضی به ترتیب به سطح زیرین و سطح جانبی کفشک برخورد می‌کنند (شکل ۳-۹). اما اگر سطح زیرین کفشک نسبتاً بزرگ باشد، ممکن است هر دو موج به سطح زیرین کفشک برخورد کنند.

برای ایجاد مد خالص از موج لمب، زاویه‌ی شکست از معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\theta_{inc(L)} = \sin^{-1} \frac{c_{plexiglass}^l}{c_{plate}^{ph}} \quad ۷-۳$$

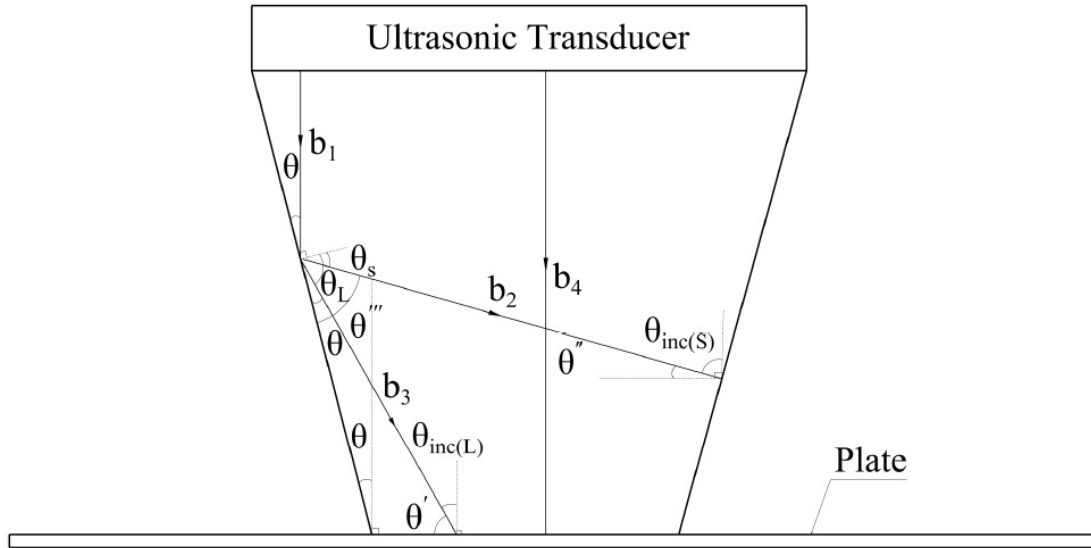
با توجه به شکل ۳-۹، رابطه‌ی زیر برقرار است:

$$\theta' + \left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) + \theta = \pi \rightarrow \theta' = \frac{\pi}{2} - 2\theta \quad ۸-۳$$

$$\theta' + \theta_{inc(L)} = \frac{\pi}{2} \rightarrow \theta_{inc(L)} = 2\theta = \theta_{cone} = \pi - 2\theta_L \quad ۹-۳$$

که در روابط فوق، $\theta_{inc(L)}$ زاویه‌ی تابش موج طولی، θ_L زاویه‌ی شکست موج طولی و θ نصف زاویه‌ی رأس مخروط است. با توجه به معادلات فوق، زاویه‌ی تابش موج برای هر مد برابر با زاویه‌ی رأس مخروط است.

^۱ Snell's law



شکل ۳-۹- تولید موج لمب با کفشک مخروطی ناقص [۶۵]

در شکل ۳-۹، b_1 نشان‌دهنده‌ی پرتویی است که به سطح جانبی کفشک برخورد کرده و پرتوهای b_2 و b_3 را ایجاد می‌کند. b_4 نیز نشان‌دهنده‌ی پرتویی است که بدون برخورد با سطح جانبی کفشک به سطح زیرین کفشک می‌رسد. اگر سطح زیرین کفشک به قدر کافی بزرگ باشد، پرتو b_2 می‌تواند به سطح زیرین کفشک برخورد کند. بنابراین، زاویه‌ی تابش پرتو b_2 باید به اندازه‌ای باشد که به سطح زیرین کفشک برخورد نکند. این زاویه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\theta_s = \sin^{-1} \left(\sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) / \left(\frac{c_{plexiglass}^l}{c_{plexiglass}^s} \right) \right) \quad 10-3$$

$$\theta''' = \frac{\pi}{2} - \theta_s \quad 11-3$$

$$\theta''' + \theta'' + \theta + \frac{\pi}{2} = \pi \rightarrow \left(\frac{\pi}{2} - \theta_s \right) + \theta'' + \theta + \frac{\pi}{2} = \pi \rightarrow \theta'' = \theta_s - \theta \quad 12-3$$

$$\theta_{inc(s)} = \frac{\pi}{2} - \theta_s + \theta \quad 13-3$$

که در معادلات فوق، θ_s زاویه‌ی شکست موج عرضی، $\theta_{inc(s)}$ زاویه‌ی تابش موج عرضی و $c_{plexiglass}^s$ سرعت موج عرضی در پلکسی‌گلاس است. زاویه‌ی تابش موج عرضی بزرگ‌تر از زاویه‌ی تابش موج طولی است. اگر

زاویه‌ی تابش بزرگ‌تر از زاویه‌ی بحرانی^۱ باشد، موجی درون ورق ارسال نمی‌شود. این موضوع باید در طراحی در نظر گرفته شود [۶۵].

۳-۶-۱- طراحی کفشک

فرکانس تحریک در این آزمایش 2.25 MHz انتخاب شده است. در آزمایش از ورقی با ضخامت 0.5 میلیمتر و از جنس آلیاژ آلومینیوم ۲۰۱۴ استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۳-۲ آمده است. زاویه‌ی تحریک مد S₀ با استفاده از منحنی پاشندگی ورق آلومینیومی (شکل ۳-۱۰) در فرکانس 2.25 MHz عبارت است از:

$$\theta_{inc(L)} = \sin^{-1} \frac{c_{plexiglass}^L}{c_{plate}^{ph}} = \sin^{-1} \frac{2730}{5376} = 30 \quad ۳-۱۴$$

θ_{cone} با استفاده از رابطه‌ی ۳-۹ برابر با ۳۰ درجه است. همچنین بر اساس رابطه‌ی ۳-۱۰، θ_s به صورت زیر دست می‌آید:

$$\theta_s = \sin^{-1} \left(\sin \left(\frac{\pi}{2} - 15 \right) / \left(\frac{2730}{1275} \right) \right) = 26.8 \quad ۳-۱۵$$

با جایگذاری مقادیر حاصل در رابطه‌ی ۳-۱۳، نتیجه‌گیری می‌شود که $\theta_{inc(s)} = 78.4$ که از زاویه‌ی بحرانی دوم بزرگتر است. بنابراین، حتی اگر سطح مقطع زیرین کفشک بزرگ هم باشد، موج برشی وارد ورق نمی‌شود.

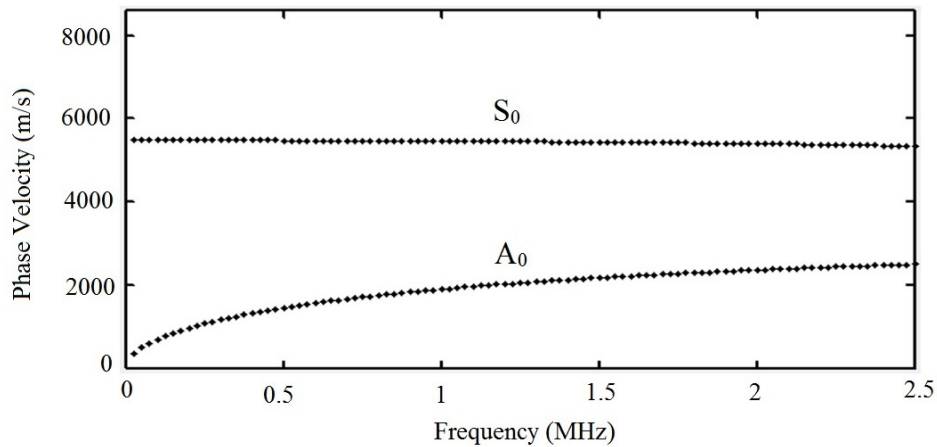
جدول ۳-۲- مشخصات فیزیکی و آکوستیکی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۱۴ [۶۶]

مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	چگالی (kg/m ³)	سرعت موج طولی (m/s)	سرعت موج عرضی (m/s)
72.4	0.33	2700	6320	3070

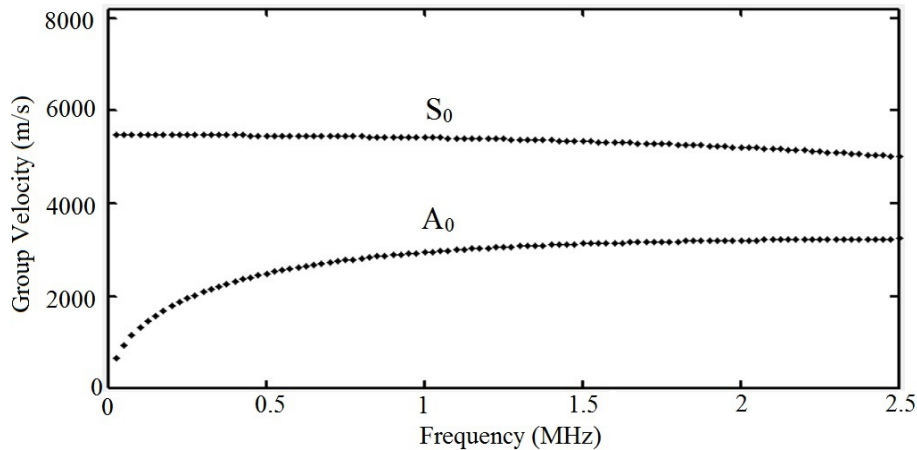
از دستگاه فرستنده/گیرنده‌ی فراصوتی Panametrics 5070PR برای ارسال موج فراصوتی استفاده شده است. برای تحریک موج لمب با استفاده از کفشک مخروطی ناقص از کاوند نرمال 2.25 MHz با قطر کریستال پیزوالکتریک 0.5 in استفاده شده است که در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است. بنابراین، قطر بزرگ کفشک باید حداقل 0.5 in باشد. پارامتر بعدی در طراحی، ارتفاع کفشک است که با توجه به مشخص بودن زاویه‌ی کفشک، اندازه‌ی قطر کوچک آن نیز مشخص می‌شود. با افزایش ارتفاع کفشک، میزان پرتوهای بازتابیده از دیواره‌ی کفشک

^۱ Critical angle

به ورق افزایش می‌یابد؛ اما در عین حال قطر زیرین کفشک کوچک‌تر شده و بخش کمتری از موج می‌تواند وارد ورق شود. ارتفاع کفشک طوری تعیین می‌شود که همه‌ی امواج بازتابیده از دیواره‌ی کفشک به ورق منتقل شوند [۶۵]. در اینجا قطر بزرگ کفشک 20 mm، ارتفاع کفشک 23 mm و قطر کوچک کفشک 7 mm انتخاب شده است. کاوند نرمال بر روی کفشک مخروطی قرار می‌گیرد. در شکل ۳-۱۲ و شکل ۳-۱۳ به ترتیب کفشک مخروطی ناقص ساخته شده و آزمایش تحریک مد S_0 با استفاده از کفشک مخروطی ناقص نشان داده شده است. هدف از انجام این آزمایش، مقایسه‌ی تحریک مد منفرد S_0 با استفاده از کفشک مخروطی ناقص و کفشک زاویه‌ای است. در ادامه توضیحات مربوط به کفشک زاویه‌ای ارائه می‌شود.



(الف)



(ب)

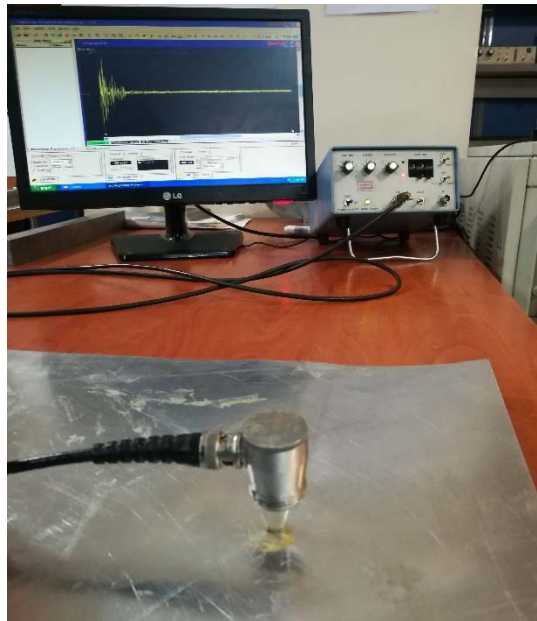
شکل ۳-۱۰-۳-۱- منحنی پاشندگی ورق آلومینیومی ۲۰۱۴ (الف) سرعت فاز (ب) سرعت گروه



شکل ۳-۱۱- کاوند نرمال 2.25 MHz



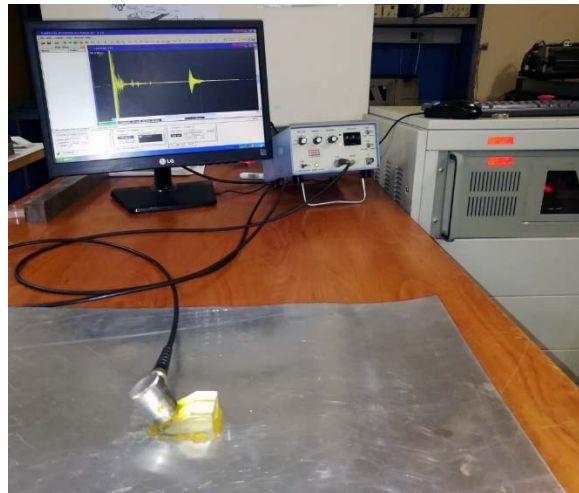
شکل ۳-۱۲- کفشک مخروطی ناقص از جنس پلکسی‌گلاس



شکل ۳-۱۳- تحریک مد S₀ با استفاده از کفشک مخروطی ناقص در فرکانس 2.25 MHz

۳-۷- تحریک موج لمب با استفاده از کفشک زاویه‌ای

همان‌طور که رابطه‌ی ۳-۱۴ نشان می‌دهد، زاویه‌ی ارسال موج فراصوتی به ورق برای تحریک موج S_0 برابر با 30° است. بنابراین، کفشک با زاویه‌ی 30° و از جنس پلکسی‌گلاس طراحی و ساخته شده است. از کاوند نرمال 2.25 MHz (شکل ۳-۱۱) تعبیه شده بر روی کفشک زاویه‌ای برای تحریک مد S_0 استفاده شده است. همان‌طور که شکل ۳-۱۴ نشان می‌دهد، از دستگاه فرستنده/گیرنده‌ی فراصوتی Panametrics 5070PR برای ارسال موج فراصوتی استفاده شده است.



شکل ۳-۱۴- تحریک مد S_0 با استفاده از کفشک زاویه‌ای در فرکانس 2.25 MHz

۳-۸- جمع‌بندی

در این فصل جزئیات روش تجربی و مشخصات تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها ارائه شد. زاویه‌ی تحریک موج H0MC در ورق فولادی با ضخامت 10 mm تعیین شد و منحنی پاشندگی ورق با استفاده از نرم‌افزار GUIGUW رسم شد. در ادامه جزئیات طراحی کفشک مخروطی ناقص جهت تحریک موج لمب در ورق ارائه شد و در انتها نیز جزئیات روش تجربی تحریک مد S_0 با استفاده از کفشک مخروطی ناقص و کفشک زاویه‌ای شرح داده شد.

فصل چهارم

شبیه‌سازی عددی

۴-۱- مقدمه

در این بخش به شبیه‌سازی عددی انتشار موج لمب در ورق پرداخته می‌شود. ابتدا روش شبیه‌سازی عددی، انتخاب گام زمانی و اندازه‌ی المان‌ها ارائه می‌شود. سپس شبیه‌سازی انتشار موج HOMC در ورق فولادی شرح داده شده است. در انتها جزئیات شبیه‌سازی عددی با استفاده از کفشک زاویه‌ای و کفشک مخروطی ناقص در ورق آلومینیومی ارائه شده است.

۴-۲- شبیه‌سازی اجزای محدود موج لمب

شبیه‌سازی اجزای محدود امواج هدایت‌شده‌ی فراصوتی بر پایه‌ی روش اجزای محدود انتگرال‌گیری صریح زمانی^۱ است. در ادامه اصول شبیه‌سازی بر طبق این روش آورده شده است. در شروع اولین گام زمانی، معادله‌ی تعادل دینامیکی به شکل زیر برقرار است [۲۲]:

$$M\ddot{u} = P - I \quad 1-4$$

که در آن M ماتریس جرم گره، \ddot{u} شتاب گره، P نیروی خارجی اعمال‌شده و I نیروی محرک^۲ المانهای داخلی است.

در نقطه‌ی شروع گام زمانی، زمان t ، شتاب برابر است با:

$$\ddot{u}_t = (M)^{-1}(P - I)_t \quad 2-4$$

سپس با استفاده از روش تفاضل مرکزی^۳، انتگرال‌گیری روی شتاب انجام می‌شود. سرعت میانی گام زمانی کنونی $(t + \frac{\Delta t}{2})$ با استفاده از سرعت میانی گام زمانی پیشین $(t - \frac{\Delta t}{2})$ با استفاده از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\dot{u}_{t+\frac{\Delta t}{2}} = \dot{u}_{t-\frac{\Delta t}{2}} + \frac{\Delta t_{t+\Delta t} + \Delta t_t}{2} \ddot{u}_t \quad 3-4$$

جابه‌جایی $u_{t+\Delta t}$ در انتهای گام زمانی با استفاده از جابه‌جایی در ابتدای گام زمانی (u_t) به صورت زیر به دست می‌آید.

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \Delta t_{t+\Delta t} \left(\dot{u}_{t+\frac{\Delta t}{2}} \right) \quad 4-4$$

¹ Explicit time integration

² Acting force

³ Central difference method

در ادامه کرنش، تنش و نیروی داخلی گره $(I_{t+\Delta t})$ را می‌توان به‌دست آورد. همه‌ی محاسبات برای گام زمانی بعدی انجام می‌شود. هنگام استفاده از روش انتگرال‌گیری صریح زمانی، برای دستیابی به نتایج دقیق در شبیه‌سازی، گام زمانی باید به اندازه‌ی کافی کوچک باشد تا شتاب در یک گام زمانی تقریباً ثابت باشد. انتگرال‌گیری صریح زمانی، روش کاملاً مناسبی برای حل مسائل دینامیکی سرعت بالا است و در این مسائل برای دستیابی به حل با دقت بالا، بایستی از گام زمانی کوچک استفاده شود [۲۲].

۴-۲-۱- تعیین گام زمانی

تعیین گام زمانی یکی از مراحل مهم در شبیه‌سازی انتشار موج است. با انتخاب گام زمانی کوچک، دقت تحلیل اجزای محدود افزایش می‌یابد. از طرفی کوچک کردن گام زمانی موجب افزایش زمان تحلیل می‌شود. بنابراین، باید مقدار گام زمانی به درستی انتخاب شود. در ادامه، راهکارهایی جهت انتخاب گام زمانی مناسب ارائه می‌شود. می‌توان معادله‌ی ۴-۴ را در حالت کلی به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$u_{i+1} = u_i + \Delta t_{i+1}(\dot{u}_{i+0.5}) \quad 5-4$$

در رابطه‌ی فوق، Δt گام زمانی و i شماره‌ی گام زمانی است. گام زمانی (Δt) باید از گام زمانی بحرانی (Δt_{cr}) کوچک‌تر باشد. Δt_{cr} در یک سیستم نامیرا^۲ وابسته به بزرگ‌ترین فرکانس در کوچک‌ترین المان است [۷۸].

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} = \frac{2}{\omega_{max}} \quad 6-4$$

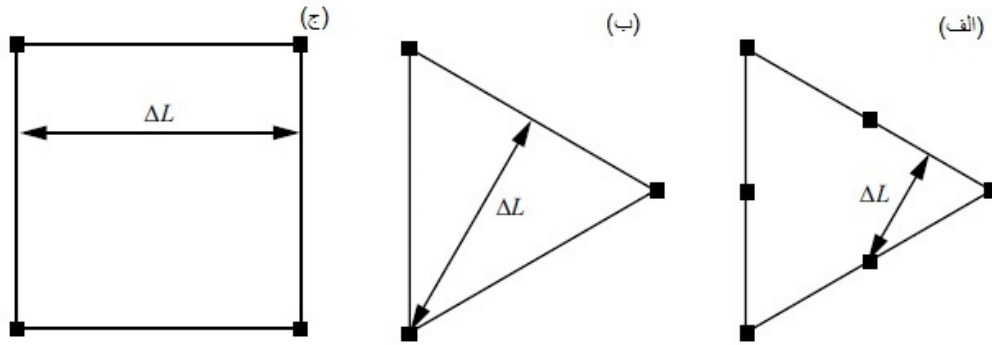
در شبیه‌سازی انتشار موج با فرض کوچک بودن تغییر شکل المان، غالباً از تقریب زیر برای محاسبه‌ی Δt_{cr} استفاده می‌شود. در این تقریب، گام زمانی بحرانی برابر با زمان عبور موج از کوچک‌ترین المان در مدل استفاده می‌شود.

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} = \frac{\Delta L}{C_l} \quad 7-4$$

که ΔL کوچک‌ترین طول المان است. در شکل ۴-۱، ΔL برای سه نمونه المان نشان داده شده است.

¹ Critical time step

² Undamped system



شکل ۴-۱- نمایش ΔL در (الف) المان مثلثی مرتبه دو، (ب) المان مثلثی خطی، (ج) المان مربعی خطی [۶۷]

معادله‌ی ۷-۴ شرط کورانت- فردریک- لویی^۱ (CFL) نامیده می‌شود. این شرط یک شرط لازم برای همگرایی حل معادلات دیفرانسیل جزئی معین با استفاده از روش تفاضل محدود است. نسبت گام زمانی واقعی به گام زمانی بحرانی، عدد کورانت (یا CFL) نامیده می‌شود.

$$CFL = \frac{\Delta t}{\Delta t_{cr}} \quad ۸-۴$$

بنابراین، گام زمانی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta t = CFL \Delta t_{cr} = CFL \frac{\Delta L}{C_l} \quad ۹-۴$$

با توجه به اینکه نیاز است که فضای انتشار موج طوری گسسته‌سازی شود که در نهایت کوتاه‌ترین طول موج در مدل نیز گسسته شود (حداقل هفت گره در کوتاه‌ترین طول موج باشد)، تعداد زیادی گام زمانی در مدل نیاز است [۶۷].

شرط دیگری که برای تعیین گام زمانی باید رعایت شود این است که باید حداقل بیست گام زمانی در طول سیکل موج در بالاترین فرکانس موجود باشد. در نهایت برای تعیین گام زمانی در شبیه‌سازی انتشار موج لمب می‌توان از دو حد زیر استفاده کرد:

$$\Delta t < \frac{\Delta L_x}{C_g} \quad , \quad \Delta t < \frac{1}{20f_{max}} \quad ۱۰-۴$$

که ΔL_x طول المان در راستای انتشار موج لمب است [۶۸].

^۱ Courant- Friedrichs- Lewy

۴-۲-۲- تحریک موج لمب

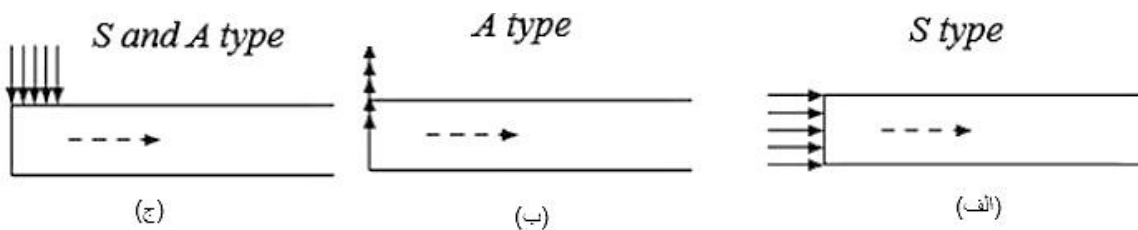
برای تحریک موج لمب از پالس تک فرکانس کوتاه استفاده می‌شود. این سیگنال شامل چند سیکل موج سینوسی است که با استفاده از تابع پنجره همینگ^۱ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad ۱۱-۴$$

از تابع پنجره هنینگ^۲ نیز می‌توان به این منظور استفاده کرد:

$$w(n) = 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad ۱۲-۴$$

در روابط فوق، N تعداد سیکل تابع تحریک است. نکته‌ی کلیدی در شبیه‌سازی انتشار موج هدایت‌شده این است که منبع تحریک چگونه اعمال شود تا موج هدایت‌شده‌ی دلخواه ایجاد شود. در شکل ۴-۲ روش‌های مختلف تحریک موج لمب نشان داده شده است.



شکل ۴-۲- روش‌های مختلف تحریک برای ایجاد موج لمب در ورق: (الف) تحریک در راستای عمود بر لبه‌ی ورق،

(ب) تحریک در راستای لبه‌ی ورق، (ج) تحریک از بالا [۲۲]

برای تولید موج لمب متقارن از تحریک لبه‌ی ورق استفاده می‌شود و این تحریک به صورت شرط مرزی جابه‌جایی، عمود بر لبه‌ی ورق اعمال می‌شود. برای تولید موج لمب نامتقارن باز هم از تحریک لبه‌ی ورق استفاده می‌شود اما این بار از شرط مرزی جابه‌جایی در راستای ورق استفاده می‌شود. از تحریک بالا برای ایجاد همزمان مدهای متقارن و نامتقارن می‌توان استفاده کرد. در این حالت، از اعمال نیرو در یک منطقه‌ی کوچک در قسمت فوقانی و لبه‌ی ورق استفاده می‌شود. برای بررسی انتشار موج لمب از هر دو روش تحریک از لبه و از بالا می‌توان استفاده کرد؛ اما برای بررسی پراکندگی از عیب تنها از روش تحریک لبه استفاده می‌شود تا بتوان یک مد منفرد در ورق ایجاد کرد [۲۲].

¹ Hamming window function

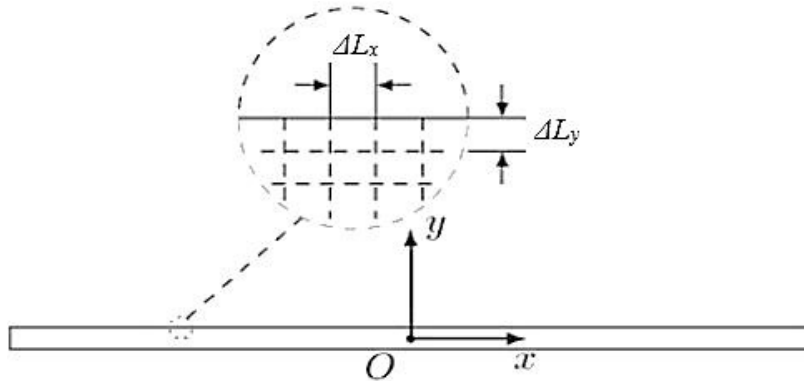
² Hanning window function

۴-۲-۳- تعیین اندازه‌ی المان

تعیین اندازه‌ی المان نیز یکی از مراحل مهم در شبیه‌سازی انتشار موج است. در شکل ۴-۳ مدل اجزای محدود انتشار موج لمب در ورق نشان داده شده است. در این تصویر ΔL_x و ΔL_y به ترتیب نشان دهنده‌ی طول المان در راستای محور x و y است. ΔL_y باید به اندازه‌ی کافی کوچک باشد (تعداد المانها در راستای ضخامت به قدر کافی زیاد باشد) تا اطمینان حاصل شود که پارامترهای مرتبط با موج مانند توزیع جابه‌جایی، تنش و سایر پارامترها در راستای y (ضخامت ورق) با دقت کافی قابل بررسی هستند. برای بررسی حالت بدون عیب تعداد المان در راستای ضخامت حدوداً ۱۰ است اما برای حالتی که عیب وجود دارد تعداد المان تقریباً برابر با ۱۰۰ خواهد بود. ΔL_x نیز باید به اندازه‌ی کافی کوچک باشد تا اطمینان حاصل شود که تعداد المانها در یک طول موج به اندازه‌ی کافی است. می‌توان از رابطه‌ی زیر برای تعیین ΔL_x استفاده کرد.

$$\frac{\lambda}{20} \leq \Delta L_x \leq \frac{\lambda}{10} \quad ۴-۱۳$$

در رابطه‌ی فوق $\lambda = \frac{c_p}{f}$ و c_p سرعت فاز و f فرکانس مرکزی موج است [۲۲].



شکل ۴-۳- مدل اجزای محدود انتشار موج لمب در ورق [۲۲]

۴-۳- شبیه‌سازی انتشار موج HOMC

در این بخش به شبیه‌سازی انتشار موج HOMC در ورق با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 2017 پرداخته می‌شود. انتشار امواج هدایت‌شده HOMC در ورق فولادی با استفاده از مدل اجزای محدود دوبعدی مدل‌سازی شده است. ضخامت ورق 10 mm و طول آن 600 mm است. مشخصات فیزیکی ورق مطابق نمونه‌ی آزمایشگاهی به صورت جدول ۴-۱ در نرم‌افزار تعیین شده است. برای ارسال زاویه‌ای موج و تحریک موج HOMC، کفشک

پلکسی‌گلاس با زاویه‌ی 52° و مشخصات جدول ۴-۱ مدل‌سازی شده و مطابق شکل ۴-۴ روی ورق تعبیه شده است. المان‌های ورق از نوع CPE4R، چهار ضلعی کرنش صفحه‌ای دوخطی چهار گرهی با انتگرال کاهش یافته، است. در کفشک از المان CPE3، المان مثلثی کرنش صفحه‌ای خطی سه گره، استفاده شده است. نوارهای سیاه رنگ در شکل ۴-۴ نشان‌دهنده‌ی المان‌های بی‌نهایت هستند که برای جلوگیری از بازتاب موج فراصوتی در اطراف کفشک و لبه‌های ورق استفاده شده است. برای کاهش نویز و تداخل پژواک‌هایی که از ترک سطحی و لبه‌های ورق منعکس می‌شود، در دیواره‌های جانبی ورق و کفشک از المان‌های بی‌نهایت، CINPE4، استفاده شده است [۲۶، ۲۷]. شرایط مرزی سطح آزاد^۱ در لبه‌های کفشک، سطوح ورق و سطوح ترک سطحی اعمال شده است. برای ساده‌سازی مسئله و با توجه به اینکه در آزمایش نیز ضخامت ماده‌ی واسط بسیار کم است و کفشک نسبت به ورق حرکت نسبی ندارد، می‌توان کفشک و ورق را چسبیده به یکدیگر در نظر گرفت و از تأثیر ماده‌ی واسط چشم‌پوشی کرد. در شبیه‌سازی‌ها بین کفشک و ورق از قید tie استفاده شده است [۶۹]. زمان حل^۲ در گام تحلیلی^۳ دینامیکی صریح^۴ برابر با $220 \mu s$ انتخاب شده است و زمان لازم برای تحلیل اجزای محدود در رایانه‌ای با پردازنده‌ی Intel Core i5 حدود هفده ساعت است.

جدول ۴-۱- پارامترهای شبیه‌سازی انتشار موج HOMC

پارامترهای مدل اجزای محدود	ورق	کفشک
جنس	فولاد	پلکسی‌گلاس
چگالی (kg/m^3)	7850	1180
مدول یانگ (GPa)	220.4	4.5
ضریب پواسون	0.29	0.37
اندازه المان (m)	8×10^{-5}	8×10^{-5}
گام زمانی (s)	1×10^{-9}	

¹ Free surface boundary condition

² Time period

³ Step

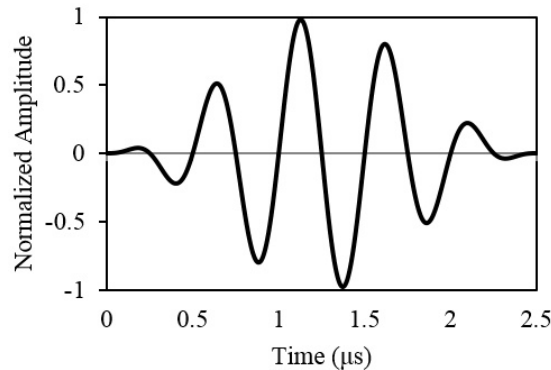
⁴ Dynamic explicit



شکل ۴-۴- طرح‌واره‌ی مدل دوبعدی مورد استفاده در شبیه‌سازی اجزای محدود

تحریک موج HPMC با استفاده از پالس تک فرکانس کوتاه (رابطه‌ی ۴-۱۴) انجام می‌شود. در این رابطه، t زمان تحریک و برابر با N/f است [۷۰]. در شکل ۴-۵ سیگنال تحریک با فرکانس مرکزی 2 MHz و تابع تحریک ۵ سیکله نشان داده شده است.

$$f(t) = \begin{cases} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi ft}{N}\right) \right] \sin(2\pi ft) & 0 \leq t \leq \frac{N}{f} \\ 0 & t < 0 \text{ or } t > \frac{N}{f} \end{cases} \quad ۴-۱۴$$



شکل ۴-۵- پالس تک فرکانس کوتاه دارای ۵ سیکل و فرکانس مرکزی 2 MHz

۴-۴- شبیه‌سازی انتشار موج لمب با استفاده از کفشک مخروطی ناقص و کفشک زاویه‌ای

انتشار موج لمب در ورق آلومینیومی با ضخامت 0.5 mm با استفاده از کفشک مخروطی ناقص و کفشک زاویه‌ای با استفاده از مدل دوبعدی کرنش صفحه‌ای شبیه‌سازی شده است. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۴-۲ ارائه شده است. از پالس تک فرکانس کوتاه با فرکانس مرکزی 2.25 MHz و ۵ سیکل (مطابق رابطه‌ی ۴-۱۴) برای تحریک مد S₀ در ورق استفاده شده است.

جدول ۴-۲- پارامترهای شبیه‌سازی انتشار موج لمب با استفاده از کفشک مخروطی ناقص و کفشک زاویه‌ای

پارامترهای مدل اجزای محدود	ورق	کفشک
جنس	آلیاژ آلومینیوم ۲۰۱۴	پلکسی گلاس
چگالی (kg/m^3)	2700	1180
مدول یانگ (GPa)	72.4	4.5
ضریب پواسون	0.33	0.37
اندازه المان (m)	6×10^{-5}	6×10^{-5}
گام زمانی (s)	1×10^{-9}	

۴-۵- جمع‌بندی

در این فصل جزئیات و روش شبیه‌سازی عددی انتشار موج لمب در ورق با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 2017 شرح داده شد. در ابتدا به استفاده از روش حل صریح مسئله اشاره شد و روابط لازم جهت تعیین گام زمانی و اندازه المان‌ها ارائه شد. در ادامه پارامترهای شبیه‌سازی انتشار موج HOMC در ورق فولادی به ضخامت 10 mm ارائه شد. در انتهای فصل به جزئیات و پارامترهای شبیه‌سازی عددی انتشار مد S₀ در ورق آلومینیومی به ضخامت 0.5 mm با استفاده از کفشک‌های زاویه‌ای و مخروطی ناقص پرداخته شد.

فصل پنجم

بررسی و تحلیل نتایج

۵-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی نتایج شبیه‌سازی عددی و تجربی پرداخته می‌شود. در ابتدای فصل، تأثیر فرکانس تحریک بر مدهای موجود در موج HOMC با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمایش بررسی و دامنه‌ی مدهای تحریک‌شده در فرکانس-ضخامت‌های مختلف در بازه‌ی 15-35 MHz-mm با یکدیگر مقایسه می‌شود. در ادامه تأثیر فرکانس-ضخامت تحریک بر حساسیت موج HOMC نسبت به ترک سطحی با عمق‌های مختلف بررسی می‌شود. در انتهای فصل، نتایج تحریک مد S_0 در ورق آلومینیومی با استفاده از کفشک زاویه‌ای و مخروطی ناقص به روش شبیه‌سازی عددی و تجربی با یکدیگر مقایسه می‌شود.

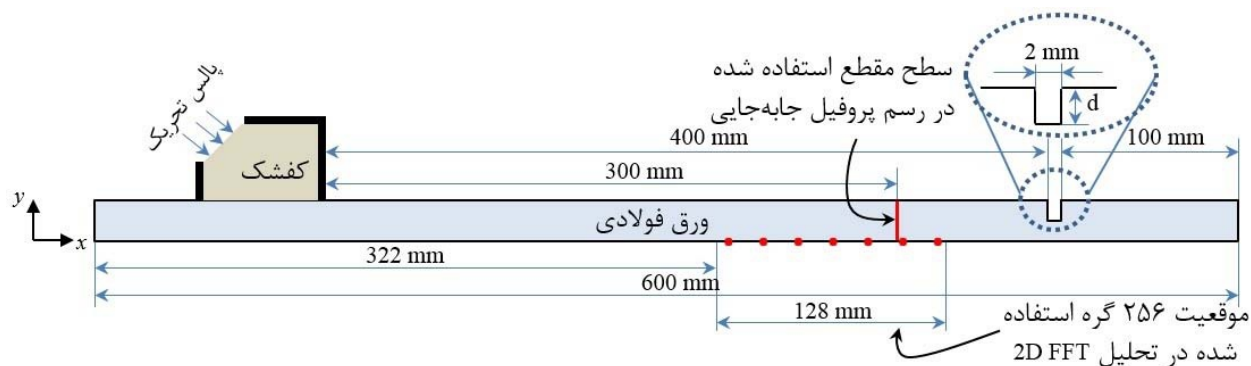
۵-۲- تأثیر فرکانس بر موج HOMC

همان‌طور که پیش از این ذکر شد، موج HOMC در بازه‌ی فرکانس-ضخامت 15-35 MHz-mm در ورق فولادی با ضخامت 10 mm منتشر می‌شود. در این بخش میزان مشارکت مدهای موج لمب در موج HOMC در فرکانس-ضخامت‌های مختلف با استفاده از شبیه‌سازی عددی و روش 2D FFT بررسی و با نتایج تجربی مقایسه می‌شود.

۵-۲-۱- بررسی تأثیر فرکانس بر موج HOMC با استفاده از شبیه‌سازی عددی

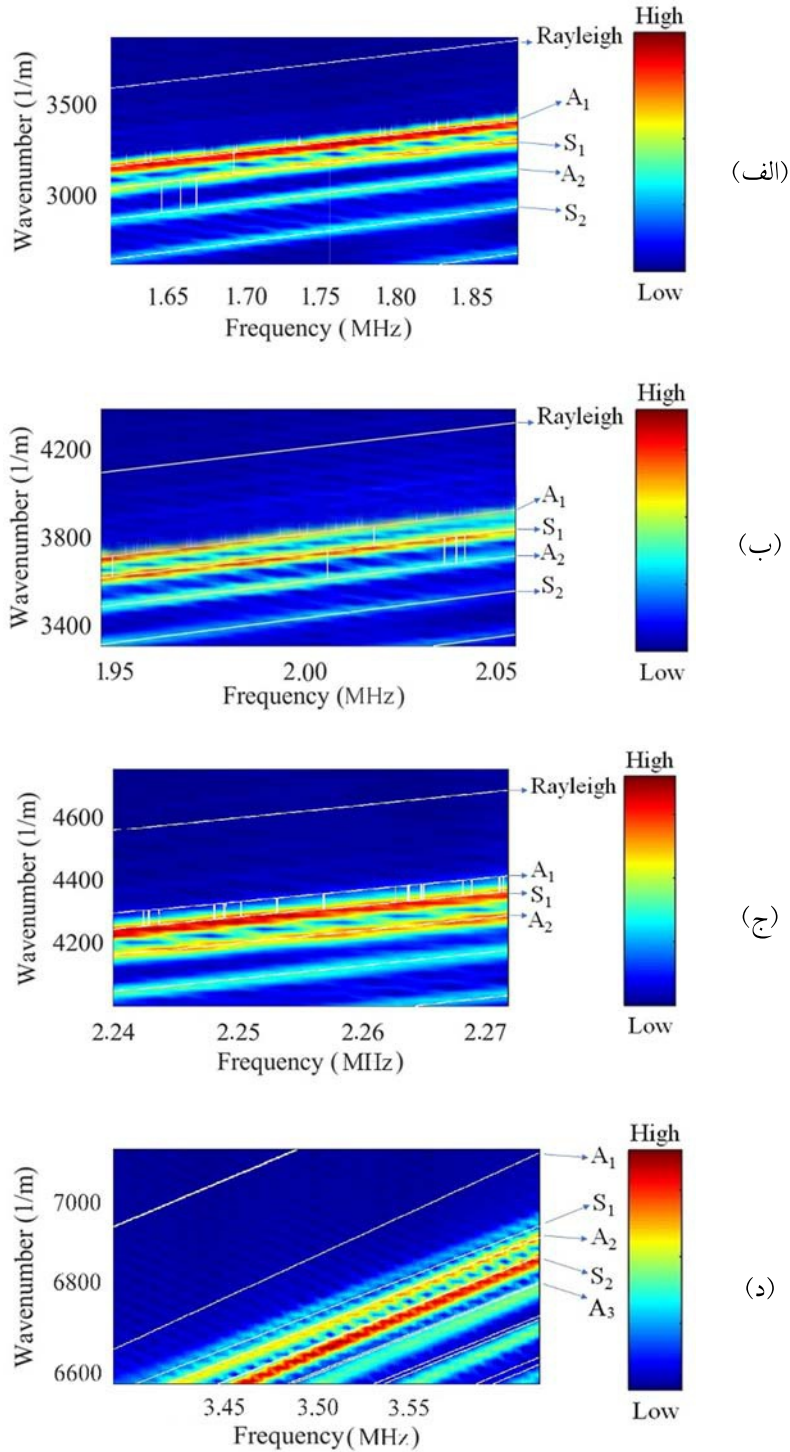
شبیه‌سازی انتشار موج HOMC در ورق فولادی با ضخامت 10 mm مطابق بخش «شبیه‌سازی انتشار موج HOMC» انجام شده است. موج HOMC با استفاده از پالس تک فرکانس کوتاه (رابطه‌ی ۴-۱۴) با ۵ سیکل و فرکانس‌های مرکزی متفاوت 1.5، 1.75، 2، 2.25، 2.5، 2.75، 3، 3.25 و 3.5 مگاهرتز در ورق تحریک‌شده است. مطابق شکل ۵-۱، ۲۵۶ گره با فاصله‌ی 0.48 mm از یکدیگر در راستای انتشار موج انتخاب شده و جابه‌جایی در راستای y این نقاط در هر 10^{-7} s از شبیه‌سازی استخراج شده است. با استفاده از تجزیه و تحلیل 2D FFT، داده‌های حوزه‌ی مکان-زمان به حوزه‌ی عدد موج-فرکانس تبدیل شده است. در شکل ۵-۲ مدهای موج لمب موجود در موج HOMC، در فرکانس‌های تحریک مختلف نشان داده شده است. خطوط سفیدرنگ در شکل ۵-۲ نشان‌دهنده‌ی مدهای موج لمب حاصل از حل تئوری مسئله است. تطابق خطوط به‌دست‌آمده از تحلیل

2D FFT و خطوط تئوری، مدهای موجود در موج HOMC را مشخص می‌کند. شدت دامنه‌ی هر مد با استفاده از رنگ‌بندی ارائه‌شده در سمت راست نمودارها مشخص می‌شود. رنگ قرمز و رنگ آبی در این شکل به ترتیب بیانگر بیشترین و کمترین دامنه است. همان‌طور که در شکل ۲-۵ (الف) مشاهده می‌شود، در فرکانس-ضخامت 17.5 MHz-mm مدهای A_1 و S_1 بیشترین دامنه را دارند. شکل ۲-۵ (ب) نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس-ضخامت تا 20 MHz-mm همچنان مدهای A_1 و S_1 بیشترین دامنه را در موج HOMC دارند. در شکل ۲-۵ (ج) با افزایش فرکانس-ضخامت تا 22.5 MHz-mm دامنه‌ی مد A_1 کاهش و دامنه‌ی مد A_2 افزایش یافته است. همان‌طور که شکل ۲-۵ (د) نشان می‌دهد، با افزایش فرکانس-ضخامت تا 35 MHz-mm دامنه‌ی مدهای مرتبه پایین A_1 و S_1 کاهش و دامنه‌ی مدهای مرتبه بالای A_2 و S_2 افزایش یافته است. شکل ۳-۵ نیز دامنه‌ی بی‌بعد شده‌ی^۱ هر یک از مدهای موجود در موج HOMC را در فرکانس-ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل ۳-۵ (الف)، در فرکانس-ضخامت 17.5 MHz-mm، دامنه‌ی مد A_1 بیشینه است و در نتیجه مد A_1 مد غالب در موج HOMC تحریک شده است. در شکل ۳-۵ (ب)، با افزایش فرکانس-ضخامت تا 20 MHz-mm، مد غالب از A_1 به S_1 تغییر می‌یابد. در فرکانس-ضخامت 22.5 MHz-mm همچنان مد S_1 مد غالب است (شکل ۳-۵ (ج)). شکل ۳-۵ (د) نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس-ضخامت تا 35 MHz-mm مرتبه‌ی مد غالب افزایش یافته و مد S_2 مد غالب در موج HOMC است.

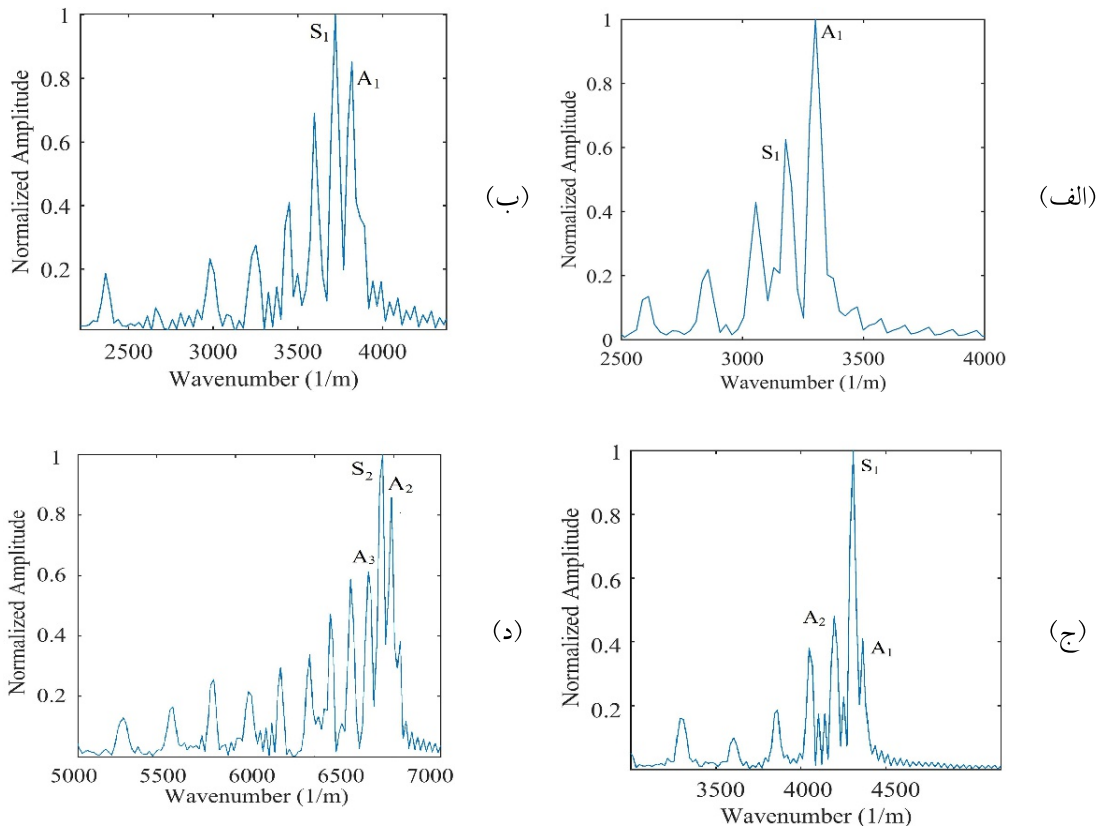


شکل ۱-۵- موقعیت مکانی گره‌های استفاده شده در روش 2D FFT در شبیه‌سازی عددی

¹ Normalized amplitude

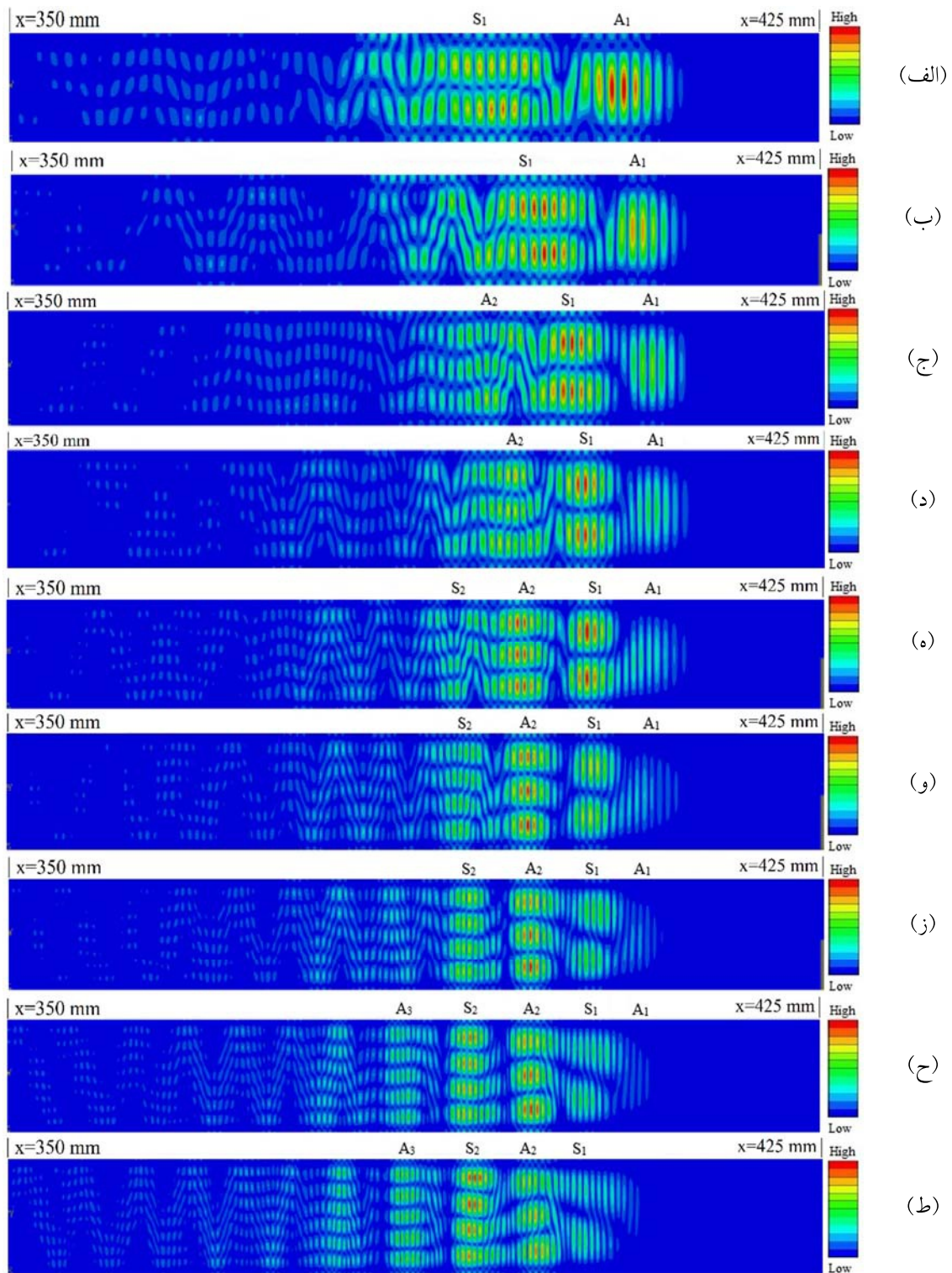


شکل ۵-۲- نمایش مدهای تحریک شده در موج HOMC در طیف عدد موج- فرکانس حاصل از تحلیل 2D FFT در فرکانس: (الف) 1.75 MHz (معادل 17.5 MHz-mm)، (ب) 2 MHz (معادل 20 MHz-mm)، (ج) 2.25 MHz (معادل 22.5 MHz-mm)، (د) 3.5 MHz (معادل 35 MHz-mm)



شکل ۵-۳- دامنه‌ی بی‌بعد شده مدهای تحریک شده در موج HOMC در فرکانس: الف) 1.75 MHz (معادل 17.5 MHz-mm)، ب) 2 MHz (معادل 20 MHz-mm)، ج) 2.25 MHz (معادل 22.5 MHz-mm)، د) 3.5 MHz (معادل 35 MHz-mm)

شکل ۵-۴، کانتور جابه‌جایی در سطح مقطع ورق در فاصله‌ی تقریبی 290 mm از کفشک را در بازه‌ی فرکانس-ضخامتی 15-35 MHz-mm نشان می‌دهد. در شکل ۵-۴ (الف) و (ب)، موج HOMC شامل مدهای A_1 و S_1 است. با افزایش فرکانس-ضخامت تا 22.5 MHz-mm (شکل ۵-۴ (ج) و (د))، مد A_2 نیز تحریک شده و مد S_1 ، مد غالب در موج HOMC می‌شود. شکل ۵-۴ (ه) نشان می‌دهد که در 25 MHz-mm علاوه بر مدهای A_1 ، S_1 و A_2 ، مد مرتبه بالای S_2 نیز تحریک شده است و همچنان مد S_1 مد غالب است. در شکل ۵-۴ (و)، با افزایش فرکانس تا 27.5 MHz-mm، مد غالب از S_1 به A_2 تغییر می‌کند. شکل ۵-۴ (ز) نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس-ضخامت تا 30 MHz-mm همچنان مد A_2 مد غالب است و دامنه‌ی مد مرتبه پایین A_1 کاهش و دامنه‌ی مد مرتبه بالای S_2 افزایش یافته است. در شکل ۵-۴ (ح)، همچنان مد A_2 مد غالب است و مد A_3 نیز تحریک شده است. با افزایش فرکانس-ضخامت تا 35 MHz-mm، شکل ۵-۴ (ط)، مد مرتبه پایین A_1 تحریک نمی‌شود و مد غالب از A_2 به S_2 تغییر می‌کند.



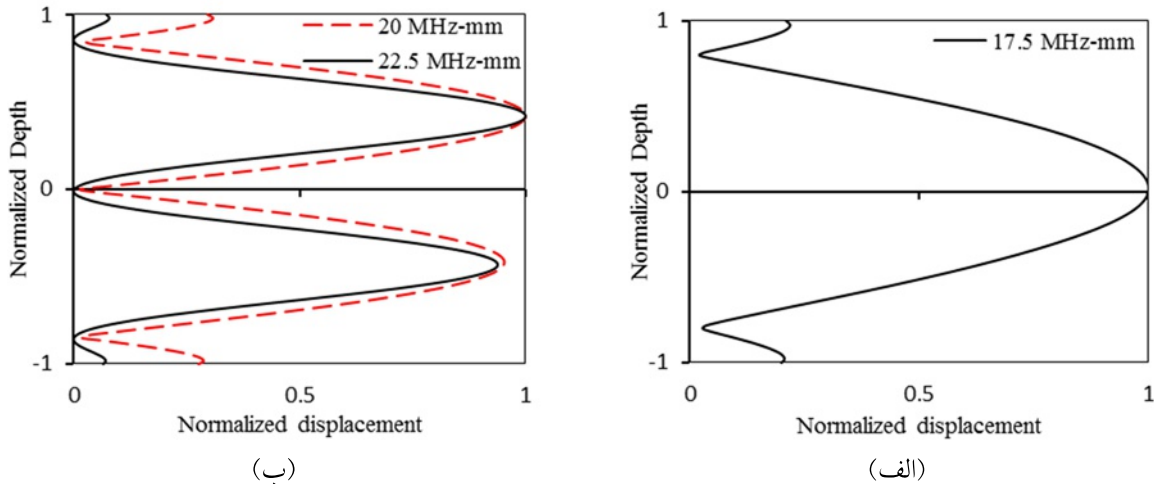
شکل ۵-۴- کانتور اندازه‌ی جابه‌جایی در سطح مقطع ورق در گام زمانی $110 \mu\text{s}$ در فاصله‌ی تقریبی 390 mm از لبه‌ی سمت چپ ورق در فرکانس-ضخامت: الف) 15 MHz-mm، ب) 17.5 MHz-mm، ج) 20 MHz-mm، د) 22.5 MHz-mm، ه) 25 MHz-mm، و) 27.5 MHz-mm، ز) 30 MHz-mm، ح) 32.5 MHz-mm، ط) 35 MHz-mm

جدول ۱-۵- مدهای تحریک شده و مد غالب در موج HOMC در فرکانس-ضخامت های مختلف

مد غالب	مدهای موجود در موج HOMC	حاصل ضرب فرکانس-ضخامت (MHz-mm)
A ₁	S ₁ , A ₁	15
A ₁	S ₁ , A ₁	17.5
S ₁	A ₂ , S ₁ , A ₁	20
S ₁	A ₂ , S ₁ , A ₁	22.5
S ₁	S ₂ , A ₂ , S ₁ , A ₁	25
A ₂	S ₂ , A ₂ , S ₁ , A ₁	27.5
A ₂	S ₂ , A ₂ , S ₁ , A ₁	30
A ₂	A ₃ , S ₂ , A ₂ , S ₁ , A ₁	32.5
S ₂	A ₃ , S ₂ , A ₂ , S ₁	35

مدهای موجود در موج HOMC و مد غالب در فرکانس-ضخامت های مختلف در بازه ی 15-35 MHz-mm به طور خلاصه در جدول ۱-۵ ارائه شده است. طبق جدول ۱-۵، با افزایش فرکانس-ضخامت تحریک، مدهای مرتبه بالا نیز تحریک می شوند و تا فرکانس-ضخامت 32.5 MHz-mm تعداد مدهای موجود در موج HOMC افزایش می یابد. با افزایش فرکانس-ضخامت تا 35 MHz-mm مد مرتبه پایین A₁ از موج HOMC حذف شده و تعداد مدهای تحریک شده کم می شود. همچنین، با افزایش فرکانس-ضخامت تحریک، مد غالب در موج HOMC به سمت مدهای مرتبه بالا میل می کند.

پروفیل جابه جایی موج HOMC متأثر از مد غالب است. در شکل ۵-۵ پروفیل جابه جایی موج HOMC در فرکانس-ضخامت های 17.5، 20 و 22.5 MHz-mm نشان داده شده است. با توجه به این شکل، پروفیل جابه جایی موج HOMC نسبت به ضخامت ورق متقارن است، بنابراین، حساسیت موج نسبت به عیوب سطح بالا و پایین ورق تقریباً، یکسان است. مقایسه ی شکل ۵-۵ (الف) و (ب) نشان می دهد که با افزایش فرکانس-ضخامت تحریک، پروفیل جابه جایی پیچیده تر شده و تعداد نوسانات آن افزایش می یابد.



شکل ۵-۵- پروفیل جابه‌جایی موج HOMC در فرکانس-ضخامت: الف) 17.5 MHz-mm، ب) 20 MHz-mm و 22.5 MHz-mm

۵-۲-۲- بررسی تأثیر فرکانس بر موج HOMC به روش تجربی

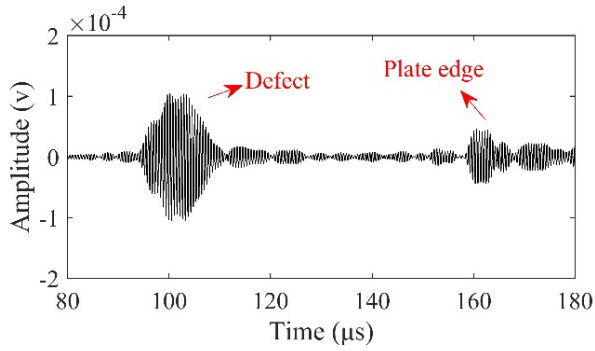
در بررسی تجربی تأثیر فرکانس-ضخامت بر موج HOMC از دستگاه فرستنده/گیرنده USB-UT350 استفاده شده است. همان‌طور که پیش از این ذکر شد، این دستگاه قابلیت تحریک موج در باند فرکانسی کاوند را دارد. از کاوند زاویه متغیر 2 MHz برای تحریک موج HOMC در ورق فولادی با ضخامت 10 mm استفاده شده است. یک لایه‌ی نازک گریس بین کاوند و ورق، به‌عنوان ماده‌ی واسط^۱، استفاده شده است. در شکل ۵-۶ نمایی از آزمایش نشان داده شده است. در این آزمایش، فاصله‌ی کاوند از ترک‌های سطحی 110 mm است.

^۱ Couplant

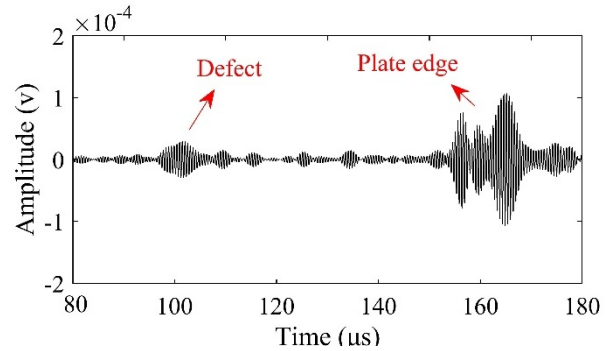


شکل ۵-۶- نمایی از آزمایش تحریک موج HOMC در ورق با استفاده از دستگاه USB-UT350

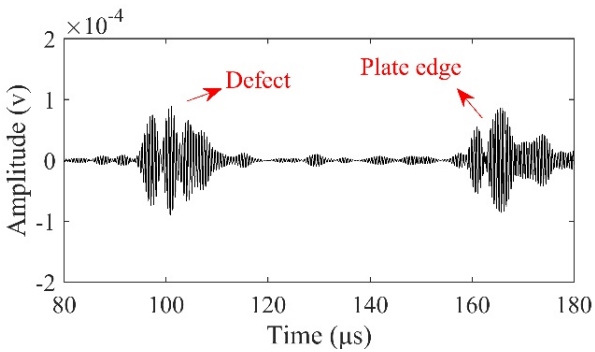
سیگنال بازتابی از ترک سطحی 5% و 50% در فرکانس-ضخامت‌های مختلف در آزمایش به‌دست آمده و در شکل ۵-۷ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، دامنه‌ی سیگنال یک عیب یکسان در فرکانس-ضخامت‌های مختلف متفاوت است. علت این تفاوت، تغییر میزان مشارکت مدهای موجود در موج HOMC با تغییر فرکانس تحریک است. در شکل ۵-۷ (الف) و (ب)، در برخورد موج HOMC با ترک سطحی به عمق‌های 5% و 50% در 17.5 MHz-mm، دامنه‌ی سیگنال عیب بیشتر از دامنه‌ی متناظر در 20 MHz-mm و 22 MHz-mm است. در تحریک موج لمب با استفاده از کاوند زاویه متغیر، فرستنده فقط جابه‌جایی خارج از صفحه بر سطح ورق اعمال می‌کند و گیرنده نیز فقط به جابه‌جایی خارج از صفحه حساس است [۴]. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در 17.5 MHz-mm، مد A₁ و در 20 MHz-mm و 22.5 MHz-mm، مد S₁، مد غالب در موج HOMC است. با توجه به اینکه جابه‌جایی در راستای y در مد A₁ نسبت به مد S₁، بیشتر است، بنابراین، طبق نتایج شبیه‌سازی عددی نیز انتظار می‌رود که دامنه‌ی سیگنال عیب در 17.5 MHz-mm بزرگتر از دامنه‌ی متناظر در 20 MHz-mm و 22.5 MHz-mm باشد. بنابراین، نتایج تجربی، نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی تأثیر فرکانس بر ماهیت و رفتار موج HOMC را تایید می‌کند.



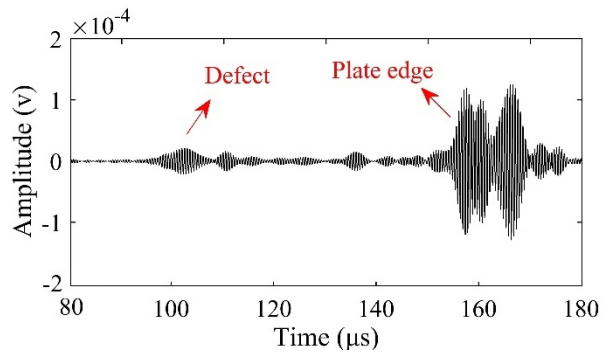
(ب)



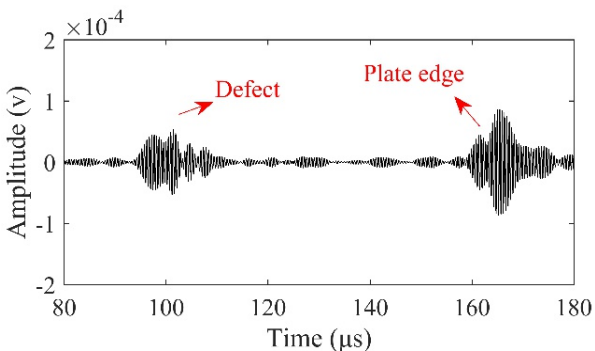
(الف)



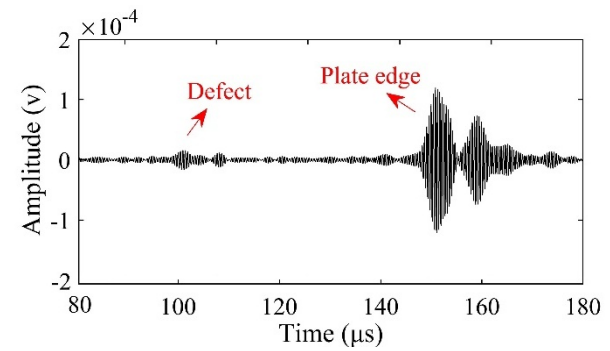
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۵-۷- برخورد موج HOMC با ترک سطحی به عمق: الف) 5% در 17.5 MHz-mm، ب) 50% در 17.5 MHz-mm، ج) 22.5 MHz-mm در 50%، د) 20 MHz-mm در 50%، ه) 5% در 22.5 MHz-mm، و) 50% در 22.5 MHz-mm

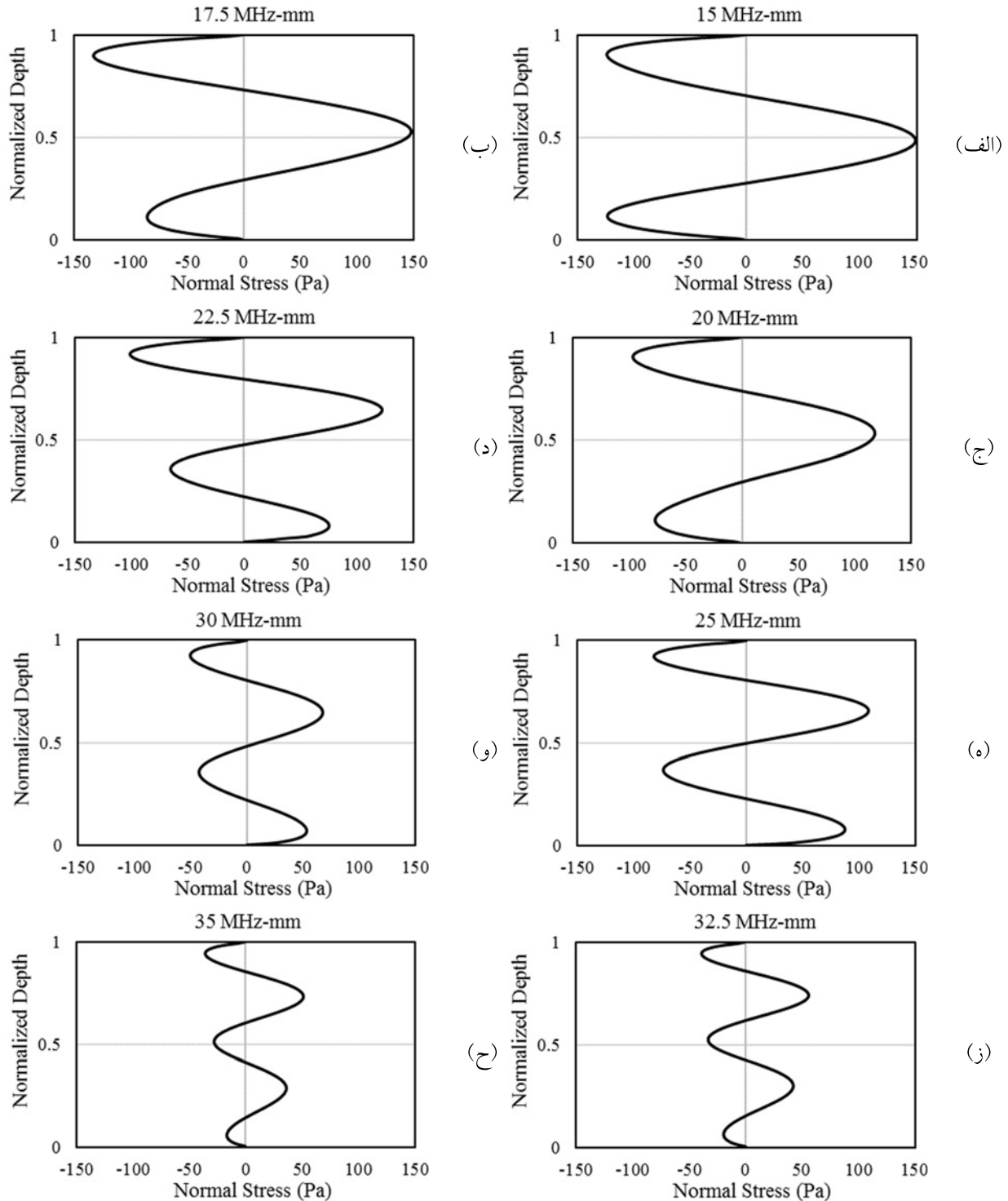
۳-۵- حساسیت موج HOMC نسبت به عیب

حساسیت موج لمب نسبت به عیب، به دامنه و توزیع تنش یا جابه‌جایی در سطح مقطع ورق، نوع مد (مقارن یا نامقارن)، حاصل ضرب فرکانس-ضخامت و هندسه و موقعیت عیب بستگی دارد [۲۳، ۳۲]. در این

بخش حساسیت موج HOMC در فرکانس-ضخامت‌های مختلف در بازه‌ی 15-35 MHz-mm نسبت به ترک‌های سطحی 5%، 10%، 30% و 50% بررسی می‌شود.

۵-۳-۱- بررسی حساسیت موج HOMC نسبت به عیب با استفاده از شبیه‌سازی عددی

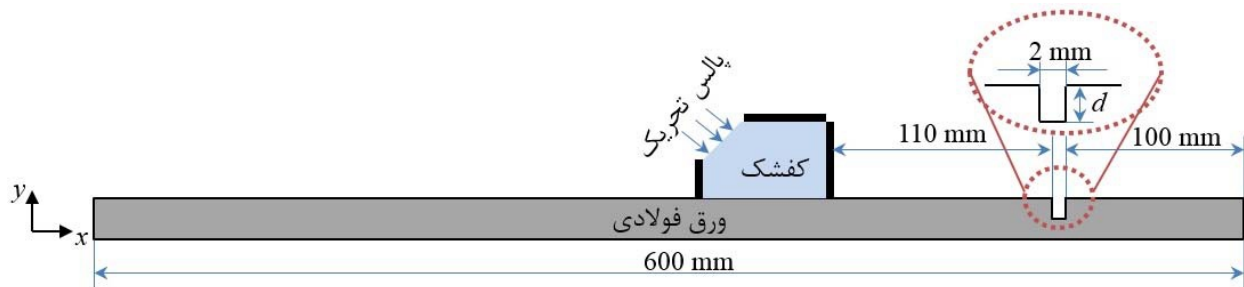
همان‌طور که پیش از این ذکر شد، تأثیر عیب بر هر یک از مولفه‌های تنش که بیشتر باشد، این مولفه به‌عنوان معیار در نظر گرفته و حساسیت موج نسبت به عیب با توجه به آن بررسی می‌شود [۳۲]. در این تحقیق، عیب مورد نظر به‌صورت ترک سطحی است که در راستای عمودی نسبت به امتداد انتشار موج قرار دارد. بنابراین، برای بررسی حساسیت موج HOMC نسبت به ترک سطحی، مولفه‌ی تنش عمودی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بررسی، فاصله‌ی کاوند و ترک‌های سطحی 110 mm است. توزیع تنش عمودی (σ_y) در راستای ضخامت ورق در فاصله‌ی 110 mm از تراگذار با استفاده از شبیه‌سازی عددی مطابق به‌دست آمده است. با توجه به شکل ۵-۸ (الف)، (ب) و (ج)، در بازه‌ی 15-20 MHz-mm، تنش عمودی در خط مرکزی ضخامت ورق، بیشینه است. با افزایش حاصل‌ضرب فرکانس-ضخامت، مطابق بخش «تأثیر فرکانس بر موج HOMC»، مرتبه‌ی مد غالب در موج HOMC افزایش می‌یابد و در نتیجه تعداد نوسانات پروفایل تنش نیز زیاد می‌شود (شکل ۵-۸). در شکل ۵-۸ (د)، (ه) و (و)، تنش عمودی در خط مرکزی ورق صفر است. مطابق شکل ۵-۸ (ز) و (ح)، توزیع تنش عمودی در ضخامت ورق، نسبت به خط مرکزی ورق، تقریباً متقارن است. مقایسه‌ی توزیع تنش عمودی در فرکانس-ضخامت‌های مختلف در شکل ۵-۸ نشان می‌دهد که مقدار تنش عمودی با افزایش حاصل‌ضرب فرکانس-ضخامت، کاهش می‌یابد. کاهش مقدار تنش عمودی، می‌تواند موجب کاهش حساسیت موج HOMC نسبت به ترک سطحی شود. از طرفی با افزایش فرکانس-ضخامت، مد غالب در موج HOMC به سمت مدهای مرتبه بالا میل می‌کند و مدهای مرتبه بالا در شناسایی عیوب کوچک، حساسیت بیشتری دارند [۴]. بنابراین، در ادامه برای بررسی حساسیت موج HOMC نسبت به ترک سطحی، ضریب بازتاب ترک‌های سطحی 5%، 10%، 30% و 50% در بازه‌ی 15-35 MHz-mm با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمایش به‌دست آمده است. طرح‌واره‌ی شبیه‌سازی در شکل ۵-۹ نشان داده شده و پارامترهای شبیه‌سازی مطابق جدول ۴-۱ است. آزمایش و شبیه‌سازی به روش بازتابی انجام شده است. جابه‌جایی در راستای y گره‌های روی لبه‌ی مورب کفشک، میانگین‌گیری شده و به‌عنوان سیگنال خروجی ارائه شده است.



شکل ۵-۸- توزیع تنش عمودی موج HOMC در راستای ضخامت ورق در فاصله‌ی 110 mm از تراگذار در فرکانس-ضخامت:

(الف) 15 MHz-mm، (ب) 17.5 MHz-mm، (ج) 20 MHz-mm، (د) 22.5 MHz-mm، (ه) 25 MHz-mm، (و) 30 MHz-mm، (ز)

35 MHz-mm، (ح) 32.5 Mz-mm



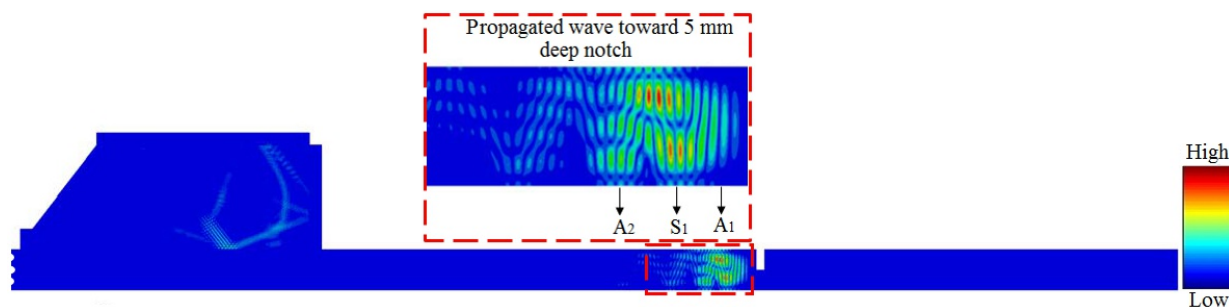
شکل ۵-۹- طرح‌واره‌ی شبیه‌سازی دوبعدی انتشار موج HOMC در بررسی حساسیت موج به ترک سطحی

در شکل ۵-۱۰ انتشار موج HOMC و بازتابش موج از ترک سطحی و لبه‌ی ورق نشان داده شده است. شکل ۵-۱۰ (الف)، کانتور جابه‌جایی موج HOMC پیش از برخورد با ترک سطحی 50% را در گام زمانی 56 μs نشان می‌دهد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که موج HOMC در فرکانس-ضخامت 20 MHz-mm، شامل مدهای A_1 ، S_1 و A_2 است. مطابق شکل ۵-۱۰ (ب)، بخشی از موج HOMC در برخورد با ترک سطحی بازتابیده شده است و به سمت تراگذار می‌رود و بخش دیگر موج از ترک سطحی عبور کرده و به سمت لبه‌ی ورق پیشروی می‌کند. در شکل ۵-۱۰ (ج)، موج بازتابیده از ترک سطحی، به تراگذار رسیده و موج بازتابیده از لبه‌ی ورق به سمت تراگذار می‌رود.

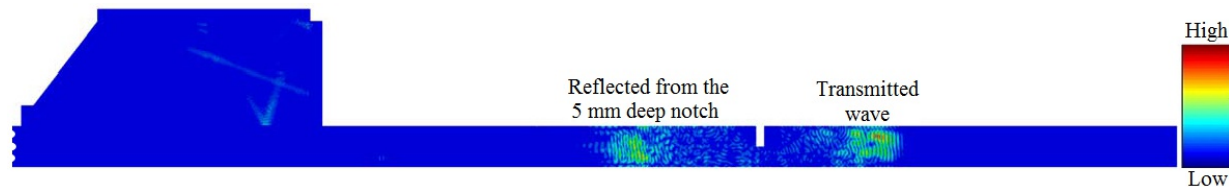
۵-۳-۲- بررسی حساسیت موج HOMC نسبت به عیب به روش تجربی

برای به‌دست آوردن ضریب بازتاب ترک‌های سطحی 5%، 10%، 30% و 50%، آزمایشی مطابق بخش «بررسی تأثیر فرکانس بر موج HOMC به روش تجربی» انجام شده و سیگنال عیب در حاصل ضرب فرکانس-ضخامت 17.5 MHz-mm، 20 MHz-mm و 22.5 MHz-mm برای ترک‌های سطحی مختلف به‌دست آمده است. همچنین با استفاده از روش ارسال-دریافت^۱ دامنه‌ی سیگنال ارسالی در محل عیب به‌دست آمده است. ادامه نتایج شبیه‌سازی عددی و تجربی با یکدیگر مقایسه شده است.

^۱ Pitch-catch



(الف)



(ب)



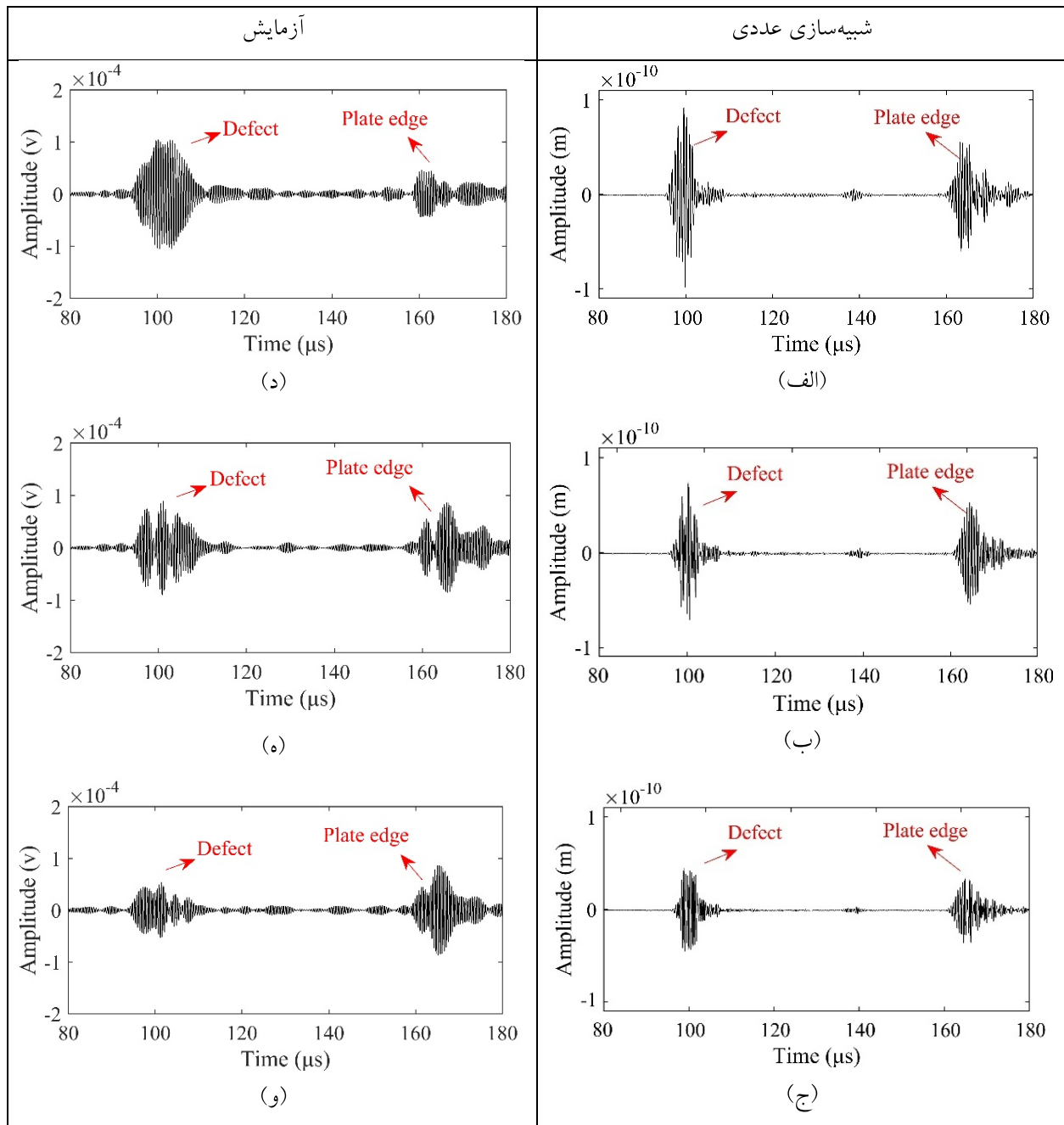
(ج)

شکل ۵-۱۰- کانطور جابه‌جایی موج HOMC در برخورد با ترک سطحی در 50% در فرکانس-ضخامت 20 MHz-mm در گام زمانی: الف) 56 μs ، ب) 68 μs و ج) 111 μs

۵-۳-۳- مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی عددی و تجربی

همان‌طور که در بخش‌های قبل شرح داده شد، با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمایش، سیگنال ترک‌های سطحی 5%، 10%، 30% و 50%، در فرکانس-ضخامت‌های مختلف به دست آمد. در شکل ۵-۱۱ سیگنال شبیه‌سازی برخورد موج HOMC با ترک سطحی 50% در فرکانس-ضخامت‌های 17.5 MHz-mm، 20 MHz-mm و 22.5 MHz-mm با سیگنال تجربی متناظر مقایسه شده است. مقایسه‌ی سیگنال‌های حاصل از شبیه‌سازی، شکل ۵-۱۱ (الف)، (ب) و (ج)، نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس-ضخامت، دامنه‌ی سیگنال عیب کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۵-۱۱ (د)، (ه) و (و)، نتایج آزمایش نیز، نتایج شبیه‌سازی عددی را تایید می‌کند. در شکل ۵-۱۲ ضریب بازتاب ترک‌های سطحی 5%، 10%، 30% و 50%، در فرکانس-ضخامت‌های مختلف، حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش عمق ترک سطحی،

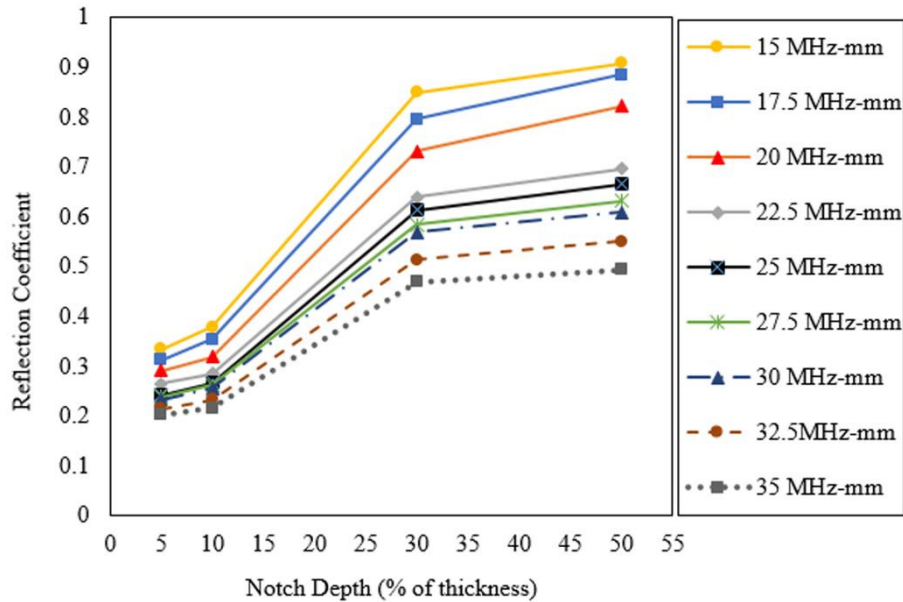
ضریب بازتاب افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فرکانس-ضخامت تحریک، ضریب بازتاب کم می‌شود؛ در نتیجه حساسیت موج HOMC با افزایش فرکانس-ضخامت تحریک نسبت به عیب عمودی، کاهش می‌یابد.



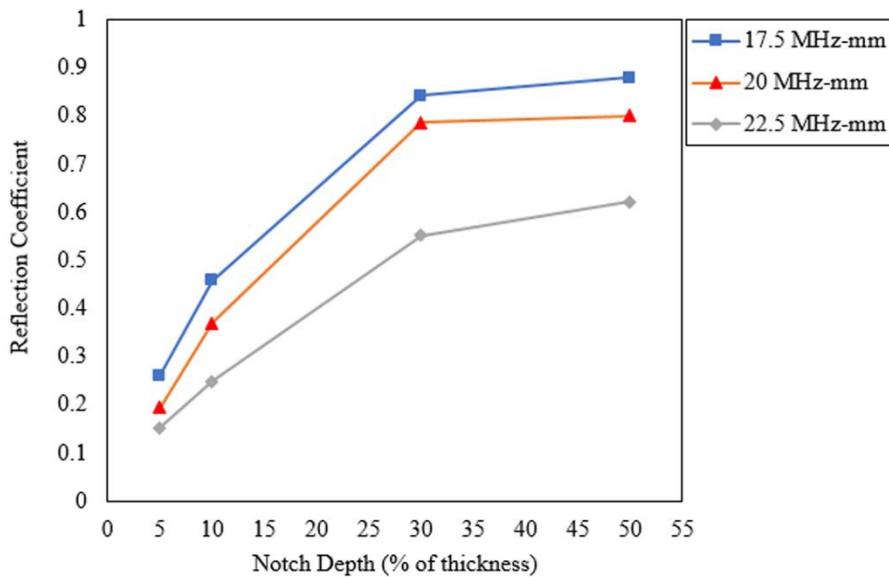
شکل ۵-۱۱- مقایسه‌ی سیگنال شبیه‌سازی برخورد موج HOMC با ترک سطحی 50% در فرکانس-ضخامت‌های: الف) 17.5

MHz-mm، ب) 20 MHz-mm و ج) 22.5 MHz-mm با سیگنال تجربی همان ترک سطحی در فرکانس-ضخامت‌های: د) 17.5

MHz-mm، ه) 20 MHz-mm و و) 22.5 MHz-mm



(الف)



(ب)

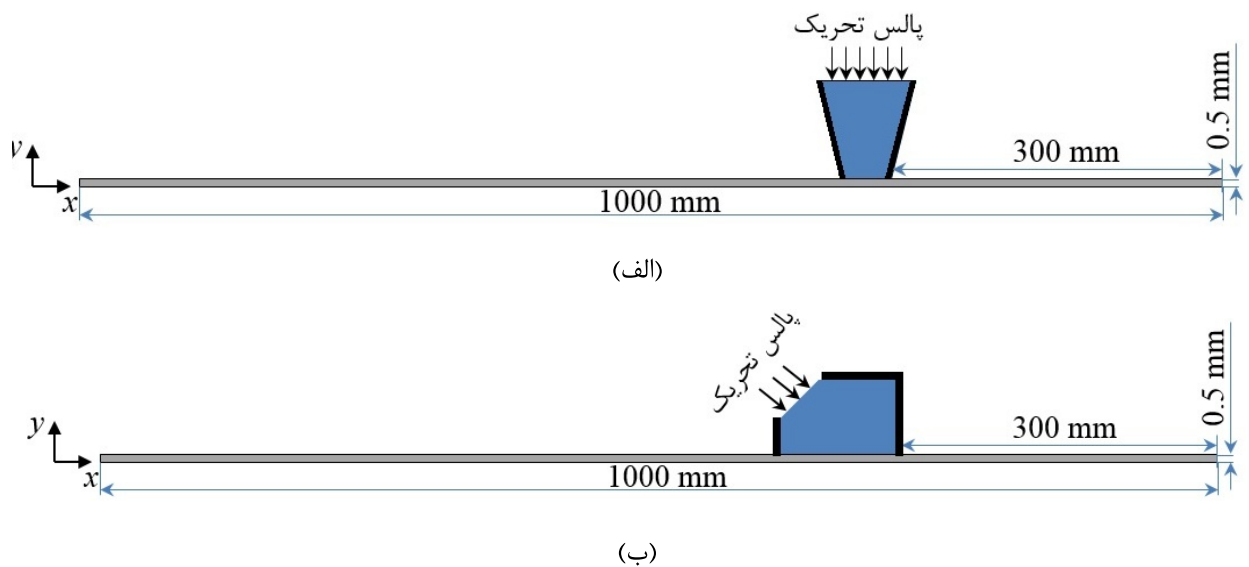
شکل ۵-۱۲- تغییرات ضریب بازتاب عیب با عمق ترک سطحی و فرکانس-ضخامت تحریک؛ الف) شبیه‌سازی عددی و ب) آزمایش

۵-۴- مقایسه‌ی تحریک موج لمب با کفشک مخروطی ناقص و کفشک زاویه‌ای

در این بخش، مد منفرد S_0 با استفاده از کفشک مخروطی ناقص و کفشک زاویه‌ای، تحریک می‌شود.

انتشار مد S_0 در ورق آلومینیومی از جنس آلیاژ ۲۰۱۴ و با ضخامت 0.5 mm ، در فرکانس 2.25 MHz و با استفاده

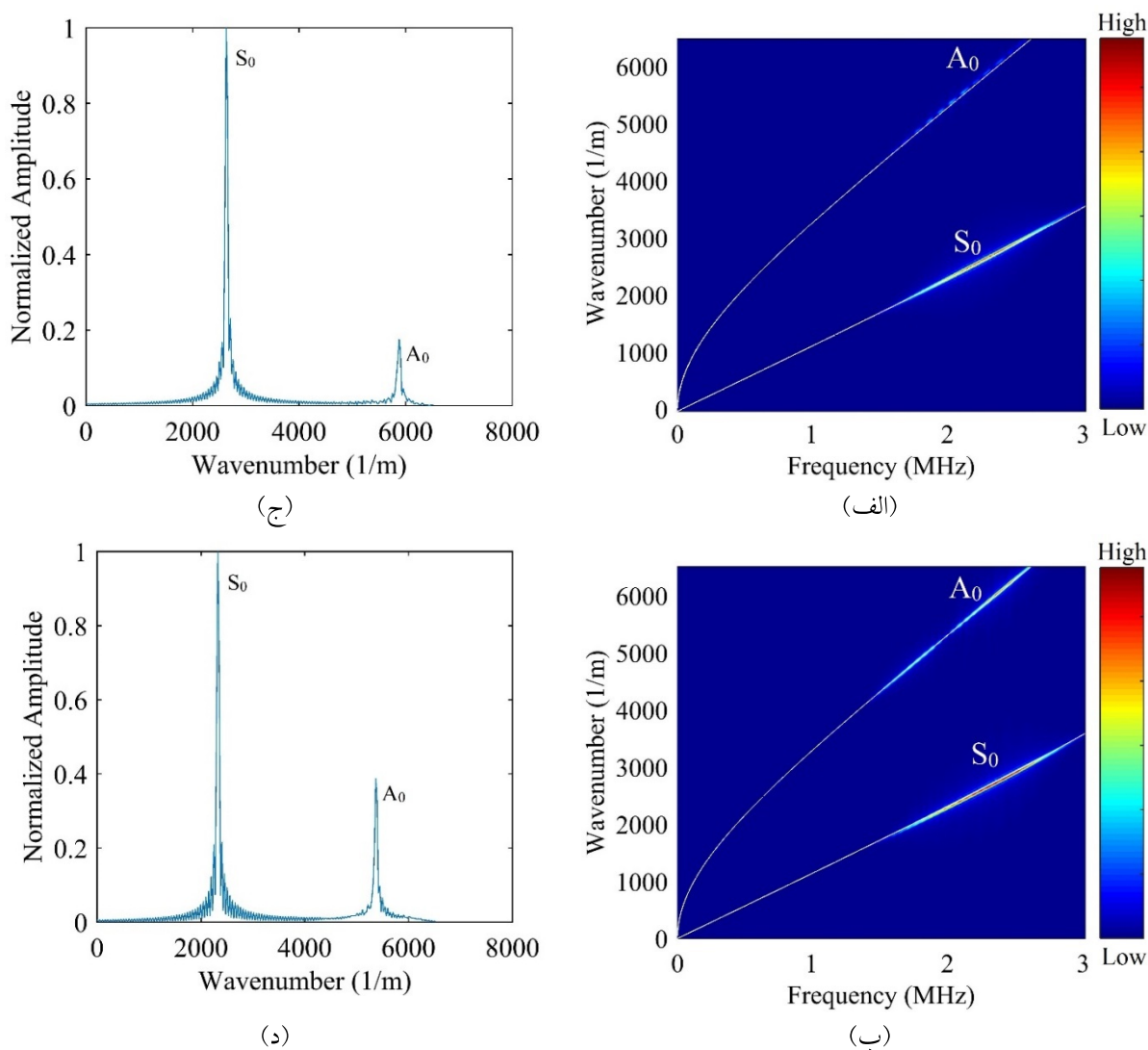
از کفشک مخروطی ناقص و زاویه‌ای شبیه‌سازی می‌شود. سپس با استفاده از تحلیل 2D FFT امکان تحریک مد منفرد با استفاده از کفشک مخروطی ناقص با کفشک زاویه‌ای مقایسه می‌شود. در ادامه تحریک مد S_0 با تعبیه‌ی کاوند نرمال 2.25 MHz روی کفشک مخروطی ناقص و کفشک زاویه‌ای به صورت تجربی بررسی می‌شود.



شکل ۵-۱۳- طرح‌واره‌ی شبیه‌سازی تحریک موج در لمب در ورق آلومینیومی با استفاده از الف) کفشک زاویه‌ای، ب) کفشک مخروطی ناقص

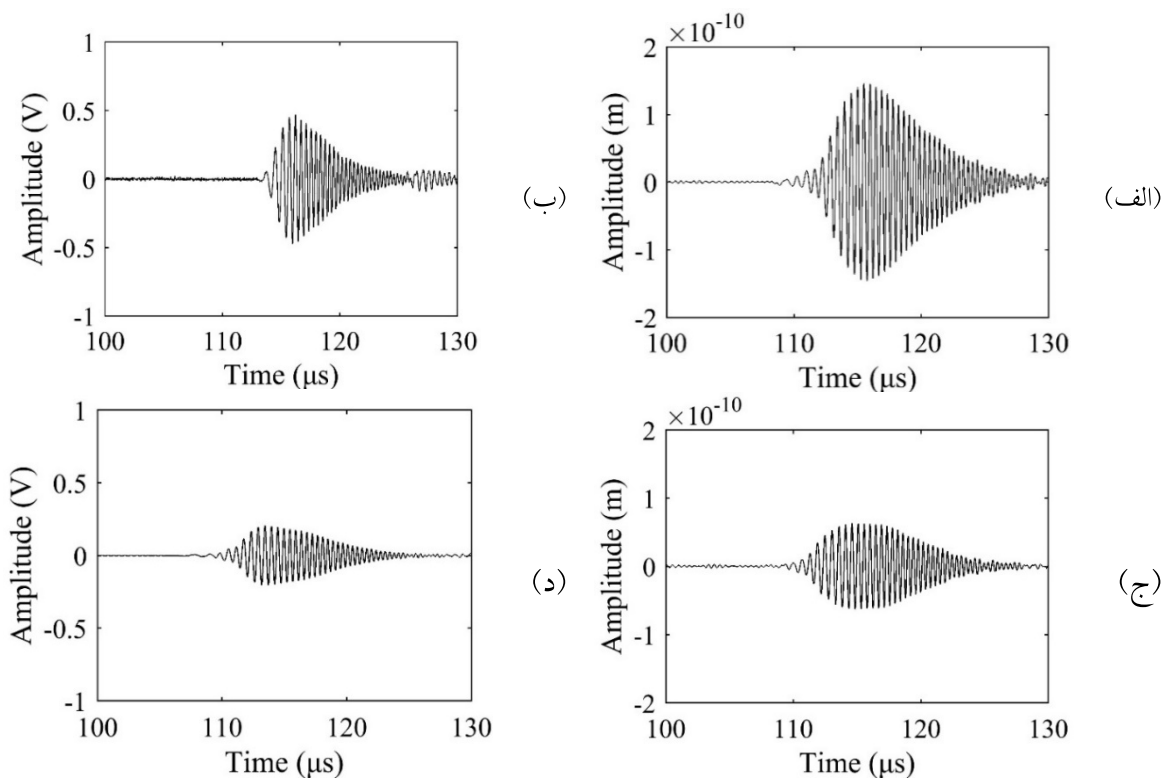
کفشک مخروطی ناقص برای تحریک مد S_0 مطابق بخش «طراحی کفشک» در ABAQUS با استفاده از پارامترهای جدول ۴-۲ مدل‌سازی شده است. سیگنال تحریک پالس کوتاه با ۵ سیکل و فرکانس مرکزی 2.25 MHz بر سطح بالایی کفشک اعمال شده است. شکل ۵-۱۳ طرح‌واره‌ی شبیه‌سازی تحریک موج در لمب در ورق آلومینیومی با ضخامت 0.5 mm را نشان می‌دهد. نوارهای سیاه رنگ اطراف کفشک زاویه‌ای و مخروطی ناقص، نمایشگر المان‌های بی‌نهایت هستند که برای کاهش میرایی موج استفاده شده‌اند. با توجه به منحنی پاشندگی ورق آلومینیومی، شکل ۳-۱۰، در فرکانس 2.25 MHz، امکان تحریک مدهای A_0 و S_0 وجود دارد. جهت بررسی دامنه‌ی مدهای A_0 و S_0 در ورق، از روش 2D FFT استفاده شده است. ۲۵۶ گره در راستای انتشار موج و با فاصله‌ی 0.48 mm از یکدیگر انتخاب شده و جابه‌جایی در راستای y این گره‌ها به دست آمده است. جابه‌جایی‌های به دست آمده در تحلیل 2D FFT از حوزه‌ی مکان-زمان به حوزه‌ی عدد موج-فرکانس تبدیل شده است. با توجه به اینکه در کفشک مخروطی ناقص بخشی از موج به ورق، بدون برخورد با لبه‌ی کفشک و به‌طور

مستقیم وارد ورق می‌شود انتظار می‌رود که دامنه‌ی مد A_0 در تحریک با کفشک مخروطی ناقص نسبت به تحریک با کفشک زاویه‌ای بیشتر باشد. شکل ۵-۱۴ (الف) و (ج) نشان می‌دهند که در فرکانس 2.25 MHz در ورق آلومینیومی با ضخامت 0.5 mm و با زاویه‌ی تحریک ۳۰ درجه، مدهای A_0 و S_0 در ورق تحریک می‌شوند. در شکل ۵-۱۴ (ب) و (د) دامنه‌ی مدهای A_0 و S_0 حاصل از کفشک زاویه‌ای و مخروطی ناقص مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که دامنه‌ی مد S_0 نسبت به مد A_0 برای کفشک زاویه‌ای نسبت به کفشک مخروطی ناقص بیشتر است؛ اما در هر دو حالت مد S_0 مد غالب است.



شکل ۵-۱۴- مقایسه‌ی طیف عدد موج- فرکانس حاصل از تحلیل 2D FFT در فرکانس 2.25 MHz با استفاده از: (الف) کفشک زاویه‌ای، (ب) کفشک مخروطی ناقص، مقایسه‌ی دامنه‌ی بی‌بعد شده‌ی مدهای A_0 و S_0 با استفاده از: (ج) کفشک زاویه‌ای، (د) کفشک مخروطی ناقص

در ادامه، مد S0 در ورق پیشروی کرده و با لبه‌ی ورق برخورد می‌کند و بازتاب می‌شود. در شکل ۱۵-۵ سیگنال بازتابی از لبه‌ی ورق در دو حالت کفشک زاویه‌ای و مخروطی ناقص به روش شبیه‌سازی عددی و تجربی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل ۱۵-۵(الف) و (ب) نتایج تجربی و شبیه‌سازی بازتابش مد S0 از لبه‌ی ورق با استفاده از کفشک زاویه‌ای با یکدیگر تطابق دارد. در شکل ۱۵-۵(ج) و (د) سیگنال لبه‌ی ورق ناشی از برخورد مد S0 ارسالی با استفاده از کفشک مخروطی ناقص در دو حالت شبیه‌سازی عددی و آزمایش با یکدیگر مقایسه شده است. شکل ۱۵-۵ نیز نشان می‌دهد که دامنه‌ی سیگنال بازتابی از لبه‌ی ورق با استفاده از کفشک زاویه‌ای در هر دو حالت شبیه‌سازی عددی و تجربی بیشتر از دامنه‌ی سیگنال متناظر با استفاده از کفشک مخروطی ناقص است. نتایج شبیه‌سازی عددی و تجربی نشان می‌دهد که تفاوت حرکات موج لمب با استفاده از کفشک مخروطی ناقص و کفشک زاویه‌ای فقط در دامنه‌ی مدهای تحریک شده است و مد غالب در هر دو حالت یکی است. از طرفی، در صورت استفاده از کفشک مخروطی ناقص، جبهه‌ی موج دایره‌ای شکل خواهد بود و می‌توان در مواردی که نیاز به این نوع تحریک است از کفشک مخروطی ناقص استفاده کرد.



شکل ۱۵-۵- سیگنال لبه‌ی ورق آلومینیومی با تحریک مد S0 با استفاده از کفشک زاویه‌ای به روش (الف) شبیه‌سازی عددی، (ب) تجربی؛ با استفاده از کفشک مخروطی ناقص به روش (ج) شبیه‌سازی عددی، (د) تجربی

۵-۵- جمع‌بندی

در این فصل نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش با یکدیگر مقایسه شد. با توجه به اینکه موج HOMC در ورق فولادی با ضخامت 10 mm در بازه‌ی فرکانس-ضخامت 15-35 MHz-mm تحریک می‌شود، تأثیر فرکانس-ضخامت تحریک در مدهای موجود در موج HOMC بررسی شد و نتایج نشان داد که با افزایش فرکانس-ضخامت تحریک، مد غالب به سمت مدهای مرتبه بالا میل می‌کند. همچنین، با افزایش فرکانس تحریک، حساسیت موج HOMC نسبت به عیب ترک سطحی کاهش یافت. در انتهای فصل، تحریک مد S₀ در فرکانس 2.25 MHz در ورق آلومینیومی با ضخامت 0.5 mm با استفاده از کفشک زاویه‌ای و کفشک مخروطی ناقص مقایسه شد و نتایج نشان داد که مد غالب در هر دو حالت یکسان است.

فصل ششم

نتیجه گیری

۶-۱- مقدمه

در این پژوهش، انتشار موج HOMC در ورق با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمایش بررسی شد. با توجه به اینکه پیش از این پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی موج HOMC انجام نشده بود، شناسایی ویژگی‌های موج HOMC مدنظر قرار گرفت. در این راستا تأثیر فرکانس تحریک بر ویژگی‌های موج HOMC و مدهای تشکیل‌دهنده‌ی آن بررسی شد. با استفاده از روش 2D FFT، مدهای مختلف موجود در موج HOMC در فرکانس-ضخامت‌های مختلف شناسایی و دامنه‌ی مدها با یکدیگر مقایسه شد. در ادامه، از موج HOMC برای شناسایی عیب ترک سطحی (شیار) در ورق استفاده شد و حساسیت این موج در فرکانس-ضخامت‌های مختلف نسبت به ترک سطحی با عمق‌های متفاوت بررسی شد. همچنین، تحریک موج لمب در ورق در فرکانس‌بالا، با استفاده از کفشک مخروطی ناقص و کفشک زاویه‌ای با یکدیگر مقایسه شد و دامنه‌ی مدهای تحریک‌شده با استفاده از روش 2D FFT در هر دو حالت ارزیابی شد.

۶-۲- نتایج

نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

- مدهای موجود در موج HOMC برای اولین بار شناسایی و دامنه‌ی مدها با یکدیگر مقایسه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که ویژگی‌های موج HOMC وابسته به مدهای موجود در این موج است.
- تأثیر فرکانس تحریک بر ساختار موج HOMC برای اولین بار بررسی شد. هرچند در پژوهش‌های پیشین، موج HOMC با ویژگی‌های ثابت و غیرقابل‌تغییر معرفی شده بود؛ نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش فرکانس تحریک موج HOMC در بازه‌ی 15-35 MHz-mm، مدهای موجود در این موج و مد غالب به سمت مدهای مرتبه بالا میل می‌کنند. بنابراین، ویژگی‌های موج HOMC ثابت نیست و رفتار این موج در فرکانس‌های مختلف، متفاوت است.
- ویژگی‌های موج HOMC تحت تأثیر مد غالب است و با شناسایی ویژگی‌های مد غالب می‌توان رفتار این موج را پیش‌بینی کرد. به‌طور مثال، توزیع جابه‌جایی و تنش در سطح مقطع سازه، متأثر

از مد غالب است.

- مقایسه‌ی ضریب بازتابش ترک سطحی با عمق‌های ۰.۵٪، ۱.۰٪، ۳.۰٪ و ۵.۰٪ در فرکانس‌های تحریک مختلف، نشان داد که با افزایش فرکانس تحریک، حساسیت موج HOMC نسبت به عیب ترک سطحی کاهش می‌یابد.
- از آنجایی که زاویه‌ی ارسال موج به داخل ورق در هر دو حالت کفشک زاویه‌ای و کفشک مخروطی ناقص یکسان است، استفاده از کفشک مخروطی ناقص برای تحریک موج لمب در مقایسه با کفشک زاویه‌ای موجب تغییر مد غالب نمی‌شود. از طرفی، در کفشک مخروطی ناقص بخشی از موج بدون شکست و به‌طور مستقیم وارد ورق می‌شود و همین امر موجب تغییر دامنه‌ی مدهای تحریک‌شده می‌شود. نتایج تحلیل 2D FFT نشان داد که تفاوت کمی در دامنه‌ی مدهای تحریک‌شده در دو حالت کفشک زاویه‌ای و کفشک مخروطی ناقص وجود دارد.

۶-۳- پیشنهادها

در ادامه‌ی پژوهش حاضر، پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

- مقایسه‌ی حساسیت موج HOMC و مد منفرد موج لمب نسبت به عیب یکسان
- مقایسه‌ی حساسیت موج HOMC و موج ریلی^۱ نسبت به عیب یکسان
- مقایسه‌ی مدهای موجود در موج HOMC در ورق با ضخامت‌های متفاوت و در فرکانس-ضخامت یکسان
- مقایسه‌ی حساسیت موج HOMC نسبت به عیب یکسان در ورق با ضخامت‌های متفاوت و در فرکانس-ضخامت یکسان
- بررسی حساسیت موج HOMC نسبت به عیب افقی در ورق
- بررسی امکان تحریک موج ریلی با استفاده از کفشک مخروطی ناقص

^۱ Rayleigh wave

مراجع

- [۱] R. Stöbel, "Air-coupled ultrasound inspection as a new non-destructive testing tool for quality assurance," PhD-Thesis, University of Stuttgart, 2004.
- [۲] P. J. Shull, *Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications*: CRC Press, 2016.
- [۳] C. Jayaraman, C. Krishnamurthy, and K. Balasubramaniam, "Higher order modes cluster (HOMC) guided waves—A new technique for ndt inspection," in *AIP Conference Proceedings*, 2009, pp. 121-128.
- [۴] Z. Su and L. Ye, *Identification of damage using Lamb waves: from fundamentals to applications* vol. 48: Springer Science & Business Media, 2009.
- [۵] J. L. Rose, *Ultrasonic guided waves in solid media*: Cambridge University Press, 2014.
- [۶] P. D. Wilcox, "A rapid signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals", *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 50, pp. 419-427, 2003.
- [۷] P. Wilcox, M. Lowe, and P. Cawley, "The effect of dispersion on long-range inspection using ultrasonic guided waves," *NDT & E International*, vol. 34 ,pp. 1-9, 2001.
- [۸] ف. هنرور و ع. صداقتی، "امواج لمب و کاربرد آنها در ارزیابی غیرمخرب"، نشریه علمی ترویجی صوت و ارتعاش، ص ۱۴، ۱۳۹۵.
- [۹] R. Monkhouse, P. Wilcox, and P. Cawley, "Flexible interdigital PVDF transducers for the generation of Lamb waves in structures," *Ultrasonics*, vol. 35, pp. 489-498, 1997.
- [۱۰] K. R. Leonard and M. K. Hinders, "Lamb wave tomography of pipe-like structures," *Ultrasonics*, vol. 43, pp. 574-583, 2005.
- [۱۱] D. Balageas, C.-P. Fritzen, and A. Güemes, *Structural health monitoring* vol. 90: John Wiley & Sons, 2010.
- [۱۲] D. Clorennec, C. Prada, and D. Royer, "Local and noncontact measurements of bulk acoustic wave velocities in thin isotropic plates and shells using zero group velocity Lamb modes," *Journal of applied physics*, vol.101, p. 034908, 2007.
- [۱۳] A. Marzani and S. Salamone, "Numerical prediction and experimental verification of temperature effect on plate waves generated and received by piezoceramic sensors," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 30, pp. 204-217, 2012.
- [۱۴] E. Anderås, L. Arapan, I. Katardjiev, and V. Yantchev, "Thin Film Plate Wave Resonant Sensor for Pressure and Gravimetric Measurements," *Procedia Engineering*, vol. 25, pp. 571-574, 2011.
- [۱۵] Z. Chen, T. Han, X. Ji, H. Guo, and W. Shi, "Lamb wave sensors array for nonviscous liquid sensing," *Science in China Series G: Physics Mechanics and Astronomy*, vol. 49, pp. 461-472, 2006.
- [۱۶] V. Prasad, K. Balasubramaniam, E. Kannan, and K. Geisinger, "Viscosity measurements of melts at high temperatures using ultrasonic guided waves," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 207, pp. 315-320, 2008.
- [۱۷] H. Faustmann, M. Münch, G. Lindner, M. Schmitt, and M. Springer, "Measurement of the properties of liquids based on the dispersion of Lamb waves in an acoustic waveguide," *Physics Procedia*, vol. 3, pp. 959-964, 2010.
- [۱۸] H.-D. Song, S. H. Cho, I. Jeon, and C.-D. Kee, "A sensing medium exchangeable hydrogen sensor using Lamb waves," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 162, pp. 348-352, 2012.
- [۱۹] L. Zhou, J.-F. Manceau, and F. Bastien, "Interaction between gas flow and a Lamb waves based microsensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 181, pp. 1-5, 2012.
- [۲۰] N. Korde and T. Kundu, "Material hardness and ageing measurement using guided ultrasonic waves," *Ultrasonics*, vol. 53, pp. 506-510, 2013.
- [۲۱] M. Deng, "Characterization of surface properties of a solid plate using nonlinear Lamb wave approach," *Ultrasonics*, vol. 44, pp. e1157-e1162, 2006.
- [۲۲] S. Huang, S. Wang, W. Li, and Q. Wang, "Finite Element Simulation of Ultrasonic Guided Waves," in *Electromagnetic Ultrasonic Guided Waves*, ed: Springer, 2016, pp. 237-270.

- [23] D. N. Alleyne and P. Cawley, "The interaction of Lamb waves with defects," *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 39, pp. 381-397, 1992.
- [24] K. Xu, D. Ta, Z. Su, and W. Wang, "Transmission analysis of ultrasonic Lamb mode conversion in a plate with partial-thickness notch," *Ultrasonics*, vol. 54, pp. 395-401, 2014.
- [25] B. Kim and Y. Roh, "Simple expressions of the reflection and transmission coefficients of fundamental Lamb waves by a rectangular notch," *Ultrasonics*, vol. 51, pp. 734-744, 2011.
- [26] P. Rajagopal, K. Balasubramaniam, S. Hill, and S. Dixon, "Interaction of Higher Order Modes Cluster (HOMC) guided waves with notch-like defects in plates," in *AIP Conference Proceedings*, 2017, p. 030015.
- [27] L. Satyarnarayan, J. Chandrasekaran, B. Maxfield, and K. Balasubramaniam, "Circumferential higher order guided wave modes for the detection and sizing of cracks and pinholes in pipe support regions," *NDT & E International*, vol. 41, pp. 32-43, 2008.
- [28] D. Ratnam, K. Balasubramaniam, and B. W. Maxfield, "Generation and detection of higher-order mode clusters of guided waves) HOMC-GW) using meander-coil EMATs," *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 59, 2012.
- [29] J. Chandrasekaran, I. Anto, K. Balasubramaniam, and K. Venkataraman, "Higher order modes cluster (HOMC) guided waves for online defect detection in annular plate region of above-ground storage tanks," *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 51, pp. 606-611, 2009.
- [30] D. Worlton, "Experimental confirmation of Lamb waves at megacycle frequencies," *Journal of Applied Physics*, vol. 32, pp. 967-971, 1961.
- [31] V. Igor'A, *Rayleigh and Lamb waves: physical theory and applications*: Plenum Press, 1967.
- [32] T. Ghosh, T. Kundu, and P. Karpur, "Efficient use of Lamb modes for detecting defects in large plates," *Ultrasonics*, vol. 36, pp. 791-801, 1998.
- [33] M. Lowe and O. Diligent, "Low-frequency reflection characteristics of the s₀ Lamb wave from a rectangular notch in a plate," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 111, pp. 64-74, 2002.
- [34] A. Demma, P. Cawley, M. Lowe, and A. Roosenbrand, "The reflection of the fundamental torsional mode from cracks and notches in pipes," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 114, pp. 611-625, 2003.
- [35] W. J. Staszewski, S. G. Pierce, K. Worden, W. R. Philp, G. R. Tomlinson, and B. Culshaw, "Wavelet signal processing for enhanced Lamb-wave defect detection in composite plates using optical fiber detection," *Optical Engineering*, vol. 36, pp. 1877-1888, 1997.
- [36] S. Grondel, E. Moulin, and C. Delebarre" ,Lamb wave assessment of fatigue damage in aluminum plates," in *Smart Structures and Materials 1999: Smart Structures and Integrated Systems*, 1999, pp. 371-382.
- [37] Z. Dworakowski, L. Ambrozinski, P. Packo, K. Dragan, and T. Stepinski, "Application of artificial neural networks for compounding multiple damage indices in Lamb-wave-based damage detection," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 22, pp. 50-61, 2015.
- [38] F. A. Masurkar and N. Yelve, "Locating a Damage in and Aluminum Plate Using Lamb Waves," in *Proceedings of 25th national conference and international exhibition for NDE*, 2015.
- [39] A. Clough and R. S. Edwards, "Characterisation of hidden defects using the near-field ultrasonic enhancement of Lamb waves," *Ultrasonics*, vol. 59, pp. 64-71, 2015.
- [40] K. Dziejciech, L. Pieczonka, P. Kijanka, and W. J. Staszewski, "Enhanced nonlinear crack-wave interactions for structural damage detection based on guided ultrasonic waves," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 23, pp. 1108-1120,2016.
- [41] J. Yang, J. He, X. Guan, D. Wang, H. Chen, W. Zhang, and Y. Liu, "A probabilistic crack size quantification method using in-situ Lamb wave test and Bayesian updating," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 78, pp. 118-133, 2016.
- [42] M .Y. Bhuiyan, Y. Shen, and V. Giurgiutiu, "Guided wave based crack detection in the rivet hole using global analytical with local FEM approach," *Materials*, vol. 9, p. 602, 2016.
- [43] C. Y. Park, A. N. Palazotto, C. S. Hale, and H. K. Jung, "Internal longitudinal damage detection in a steel

- beam using Lamb waves: Simulation and test study," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, p. 1045389X17708046, 2017.
- [44] C. Ma, W. Zhu, Y. Xiang, and H. Zhang, "Numerical and experimental investigations of nonlinear S0 Lamb mode for detection of fatigue damage," in *Ultrasonics Symposium (IUS), 2017 IEEE International*, 2017, pp. 1-4.
- [45] R. Soleimanpour and C.-T. Ng, "Locating delaminations in laminated composite beams using nonlinear guided waves," *Engineering Structures*, vol. 131, pp. 207-219, 2017.
- [46] W. H. Ong, N. Rajic, W. K. Chiu, and C. Rosalie, "Lamb wave-based detection of a controlled disbond in a lap joint," *Structural Health Monitoring*, vol. 17, pp. 668-683, 2018.
- [47] A. K. Metya, S. Tarafder, and K. Balasubramaniam, "Nonlinear Lamb wave mixing for assessing localized deformation during creep," *NDT & E International*, vol. 98, pp. 89-94, 2018.
- [48] M. Rucka, E. Wojtczak, and J. Lachowicz, "Damage imaging in Lamb wave-based inspection of adhesive joints," *Applied Sciences*, vol. 8, p. 522, 2018.
- [49] A. Sedaghati, F. Honarvar, and A. N. Sinclair, "Lamb wave-based experimental and numerical studies for detection and sizing of corrosion damage in metallic plates," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 233, pp. 2107-2120, 2019.
- [50] A. Migot, Y. Bhuiyan, and V. Giurgiutiu, "Numerical and experimental investigation of damage severity estimation using Lamb wave-based imaging methods," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 30, pp. 618-635, 2019.
- [51] H. Huo, J. He, and X. Guan, "A Bayesian fusion method for composite damage identification using Lamb wave," *Structural Health Monitoring*, p. 147592172094.2020, 2020.
- [52] H. Chen, G. Zhang, D. Fan, L. Fang, and L. Huang, "Nonlinear lamb wave analysis for microdefect identification in mechanical structural health assessment," *Measurement*, vol. 164, p. 108026, 2020.
- [53] H. Jingjing, H. Haode, G. Xuefei, and Y. Jinsong, "A Lamb wave quantification model for inclined cracks with experimental validation," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 34, pp. 601-611, 2021.
- [54] M. Aslam, P. Nagarajan, and M. Remanan, "Defect localization using nonlinear Lamb wave mixing technique," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 40, pp. 1-12, 2021.
- [55] X. Ding, C. Xu, M. Deng, Y. Zhao, X. Bi, and N. Hu, "Experimental investigation of the surface corrosion damage in plates based on nonlinear Lamb wave methods," *NDT & E International*, vol. 121, p. 102466, 2021.
- [56] M. A. Fakih, S. Mustapha, M. Harb, and C.-T. Ng, "Understanding the interaction of the fundamental Lamb-wave modes with material discontinuity: finite element analysis and experimental validation," *Structural Health Monitoring*, p. 14759217211007118, 2021.
- [57] K. Balasubramaniam, J. Chandrasekaran, B. Maxfield, and L. Satyanarayan, "Imaging hidden corrosion using ultrasonic non-dispersive higher order guided wave modes", in *AIP Conference Proceedings*, 2008, pp. 215-222.
- [58] J. Chandrasekaran, C. Krishnamurthy, and K. Balasubramaniam, "Axial higher order modes cluster (A-HOMC) guided wave for pipe inspection", in *AIP Conference Proceedings*, 2010, pp. 161-168.
- [59] A. Swaminathan, K. Balasubramaniam, C. I. Anto, and K. Venkataraman, "Higher order mode cluster (HOMC) guided wave testing of corrosion under pipe supports (CUPS)," in *National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation*, 2011, pp. 224-227.
- [60] B. Verma, S. Annamalai, and P. Rajagopal, "The effect of curvature on the scattering of circumferential higher order mode cluster (C-HOMC) from changes in cross-section", *National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation*, 2011.
- [61] P. Khalili and P. Cawley, "Excitation of single-mode lamb waves at high-frequency-thickness products," *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 63, pp. 303-312, 2016.
- [62] L. Zeng, Z. Luo, J. Lin, and J. Hua, "Excitation of Lamb waves over a large frequency-thickness product range for corrosion detection," *Smart Materials and Structures*, vol. 26, p. 095012, 2017.
- [63] D. N. Alleyne and P. Cawley, "Optimization of Lamb wave inspection techniques," *NDT & E International*,

- vol. 25, pp. 11-22, 1992.
- [۶۴] P. Bocchini, A. Marzani, and E. Viola, "Graphical user interface for guided acoustic waves," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 25, pp. 202-210, 2011.
- [۶۵] ع. صداقتی، "تشخیص ابعاد عیب دایره‌ای در ورق با استفاده از مدل‌سازی موج لمب و حل مسئله معکوس"، رساله‌ی دکترا، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۷.
- [۶۶] L. Mordfin, "Handbook of reference data for nondestructive testing," ASTM International, 2002.
- [۶۷] M. B. Drozd, "Efficient finite element modelling of ultrasound waves in elastic media," Imperial College London, 2008.
- [۶۸] S. Han, "Finite element analysis of lamb waves acting within a thin aluminum plate," Biblioscholar, 2007.
- [۶۹] Hughes, James M., et al. "The fundamental ultrasonic edge wave mode: Propagation characteristics and potential for distant damage detection." *Ultrasonics*, vol. 114, p.106369, 2021.
- [۷۰] ف. هنرور، ع. صداقتی، آ. سینکلی، "مطالعه پراکندگی امواج لمب از یک سوراخ استوانه‌ای با استفاده از روش اجزاء محدود و آزمون تجربی"، مهندسی مکانیک مدرس، شماره ۱۶، ص ۳۹۵-۴۰۴، ۲۰۱۶.

مقالات حاصل از رساله به شرح زیر است:

۱- عباسی، ز.، هنرور، ف.، مدل‌سازی انتشار خوشه مدهای مرتبه بالای (HOMC) امواج لمب در یک ورق فلزی،

پنجمین کنفرانس بین‌المللی آزمون‌های غیرمخرب ایران، تهران، ۱۳۹۷.

2- Abbasi, Z., and F. Honarvar. "Contribution of Lamb wave modes in the formation of higher order modes cluster (HOMC) guided waves." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science (2021): 09544062211042410.

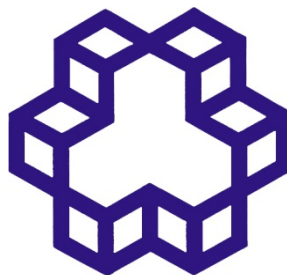
3- Abbasi, Z., and F. Honarvar. "Evaluation of the sensitivity of higher order modes cluster (HOMC) guided waves to plate defects." Applied Acoustics 187 (2022): 108512.

Abstract:

Lamb wave is a type of guided wave that propagates in thin plates. At high-frequencies, due to the dispersion property, inspection of structures is associated with error. In recent years, higher order modes cluster (HOMC) guided waves have been used in the high frequency-thickness range for nondestructive testing of materials. An HOMC guided wave consists of several higher order Lamb wave modes that travel together as a cluster. This wave is non-dispersive and its characteristics are determined by the participating modes and in particularly the dominant mode. Limited studies carried out on in the HOMC guided waves, so there is a need for more research and better understanding of the characteristics of these waves. In this study, HOMC guided wave propagation in a plate, wave properties, and interaction with a notch defect have been investigated by using numerical simulation and experiments. The modes present in the HOMC guided wave and the dominant mode in the frequency-thickness range of 15 to 35 MHz-mm were identified using two-dimensional fast Fourier transform (2D FFT) method. The results showed that with increasing the frequency-thickness product, the modes in the HOMC guided wave and the dominant mode tend towards higher order modes. Notches with different depths were machined in a 10 mm thick steel plate to investigate the sensitivity of the HOMC guided waves to defects. Numerical and experimental reflection coefficient of notches at different frequency-thickness products showed that the sensitivity of HOMC guided waves to defects decreases with increase of the frequency-thickness product. Results of this study provide a better understanding of the HOMC guided waves, and the effect of the frequency on the properties of these waves.

Keywords:

Nondestructive ultrasonic testing, Lamb wave, HOMC wave, Numerical simulation, notch



1928

K. N. Toosi University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering

A thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy (Ph.D.)
in Mechanical Engineering.

**Detection and Evaluation of Defects in Plates by Using High-
Frequency Lamb Waves**

By:

Zahra Abbasi

Supervisor:

Professor Farhang Honarvar

Winter 2022