

بررسی انتشار امواج لمب در ورق‌های لایه‌ای الیاف-فلز سفتی متغیر با استفاده از روش اجزاء محدود

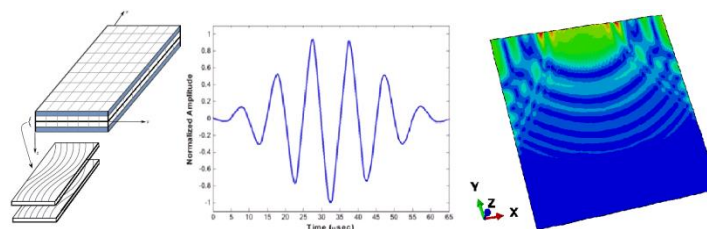
هادی قشوجی برق^۱، ملینا حسنی^۲

^۱استادیار، گروه مهندسی صنایع، مکانیک و هوافضا، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، بوئین زهرا، ایران
^۲کارشناسی، گروه مهندسی صنایع، مکانیک و هوافضا، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، بوئین زهرا، ایران

برجسته‌ها

- انتشار امواج لمب در صفحات الیاف-فلز سفتی متغیر با استفاده از روش اجزاء محدود مطالعه شده است.
- اثر تعداد لایه‌ها، ابعاد ورق و شرایط مرزی بر انتشار امواج لمب بررسی شده است.

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۳۰

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۰۹/۲۱

*نویسنده مسئول:

ghashochi.b@bzte.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

امواج لمب

ورق‌های لایه‌ای الیاف-فلز

ورق‌های لایه‌ای سفتی متغیر

روش اجزاء محدود

چکیده

امواج لمب از امواج هدایت‌شده مکانیکی می‌باشند که در ورق‌ها و پوسته‌ها انتشار می‌یابند و سرعت آن‌ها وابسته به فرکانس می‌باشد. امروزه محققان از این امواج برای شناسایی نقص در سازه‌ها بهره می‌گیرند. این امر به دلیل خاصیت امواج لمب می‌باشد که می‌توانند در سراسر سازه انتشار یابند و در صورت وجود نقص به سرعت تحت تأثیر قرار گیرند. استفاده از این روش در مقابل روش‌های سنتی با توجه به پیچیده، پرهزینه و زمان‌بر بودنشان، مطلوب می‌باشد. به‌عنوان نوآوری در این پژوهش، اثر انتشار امواج لمب در ورق‌های لایه‌ای الیاف-فلز سفتی متغیر متقارن بررسی شده است و جهت این امر از روش اجزاء محدود استفاده شده است. در این تحلیل در لایه‌های کامپوزیتی به‌جای الیاف مستقیم از الیاف منحنی شکل استفاده شده و اثر تعداد لایه‌ها، ابعاد ورق و شرایط مرزی بر انتشار امواج فوق بررسی شده است. همچنین جهت بررسی صحت مدل، سه فرکانس اول سازه با چند مرجع مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد، امواج لمب در طول ورق انتشار یافته و با برخورد به مرزهای ورق یا نقص در سازه منعکس می‌گردند و حالت انتشار یکنواخت خود را از دست می‌دهند. بر اساس این بررسی می‌توان از این روش در شناسایی وجود نقص در سازه‌های لایه‌ای الیاف-فلز سفتی متغیر بهره برد.

۱- مقدمه

امروزه از روش‌های مختلفی جهت شناسایی نقص در سازه‌ها استفاده می‌گردد. در این میان روش‌های سنتی برای تشخیص نقص‌های پنهان در اجزای سازه‌ای معمولاً پیچیده، پرهزینه و زمان‌بر هستند. از این رو محققان و صنعت‌گران از امواج لمب برای این امر استفاده می‌کنند. این امر به دلیل خاصیت این امواج به دلیل انتشار در سراسر سازه می‌باشد که در صورت وجود نقص به سرعت تحت تأثیر قرار می‌گیرند. از طرفی مواد کامپوزیتی بسیار مستعد به وجود آمدن نقص‌هایی از جمله شکست الیاف و جدایش لایه‌ها در صورت وجود نیروهای خارجی هستند. بخشی از این نقص‌ها می‌توانند در ساختارهای کامپوزیتی رشد کنند و سازه را به شرایط بحرانی برسانند.

در مجموع از امواج لمب به علت اینکه می‌توانند مسافت زیادی را طی کنند و با توجه به خصوصیت این امواج، می‌توان برای شناسایی تخریب‌های به وجود آمده در سازه‌های کامپوزیتی استفاده نمود و این روش در سال‌های اخیر به عنوان روش قابل‌اعتمادتری نسبت به سایر روش‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در این روش با ارسال موج به درون ورق بر اساس مشخصات سیگنال‌های بازگشتی محل عیب و مشخصات آن شناسایی می‌شود. با این وجود در بسیاری از موارد تفسیر سیگنال‌های دریافتی به خصوص در قطعات معیوب کار دشواری است. الناصر و همکاران [۱] در سال ۱۹۹۱ با استفاده از ترکیب روش اجزاء محدود و گسترش مدها به بررسی پراکندگی موج لمب در خط جوش یک ورق فلزی پرداختند و جهت صحت‌سنجی از اصل بقای انرژی استفاده کردند. آلین و کاولی [۲] در سال ۱۹۹۲ به تأثیر برهم‌کنش امواج لمب با عیوب مختلف با استفاده از روش اجزاء محدود پرداخته و از امواج فوق جهت بررسی عیوب دوبعدی مستطیلی و زاویه‌دار بر اساس ضریب عبور استفاده کرده و نتایج به دست آمده را با نتایج تجربی صحت‌گذاری کردند.

کسلر و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۲ به بررسی تجربی و تحلیلی انواع مدهای آسیب از جمله جدایش لایه‌ها، ترک‌های

عرضی لایه و سوراخ در مواد کامپوزیتی شبه‌همسانگرد با استفاده از امواج لمب پرداختند. آن‌ها در این پژوهش از امواج خطی به همراه حسگرهای پیزوالکتریک در نمونه‌های چندلایه و تیرهای ساندویچی با هسته‌های مختلف استفاده کرده و ساختار و ترکیب‌های بهینه‌ای از حسگرها و محرکه‌ها را پیشنهاد دادند. سو و لی [۴-۵] در سال ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ به شناسایی آسیب در چندلایه‌های کامپوزیتی شبه همسانگرد با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و انتشار امواج لمب پرداختند. آن‌ها در این پژوهش شبکه مبدل فعالی با استفاده از محرکه و سنسورهای پیزوالکتریک به عنوان یک واحد استاندارد حسگر طراحی نموده و یک شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از مجموعه داده‌هایی از پارامترهای آسیب توسعه دادند. بررسی آن‌ها نشان می‌داد، سیستم توسعه داده‌شده توانایی بسیار خوبی در ارزیابی محل، هندسه و راستای آسیب دارد. یاشیرو و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۷ با استفاده از لیزر پاسی به اسکن چندلایه‌های کامپوزیتی پرداخته و نمودار امواج لمب در حال حرکت را ارائه نمودند. روش پیشنهادی آن‌ها قادر بود بدون تماس، یک قطعه را بررسی نموده و تشخیصی مطمئن از آسیب ارائه کند.

رهی و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۷ به صورت آزمایشگاهی و تئوری سرعت مجموعه‌ای از امواج لمب در کامپوزیت‌ها با خصوصیات غیرهمسانگرد را مطالعه کردند و نشان دادند پاسخ‌های تئوری با آزمایشگاهی اختلاف دارند. آن‌ها در این تست از یک روش بر مبنای التراسونیک-اکوستیک بهره بردند و نشان دادند دلیل این اختلاف ناشی از جهت و بزرگی بین بردار موج و جهت جریان انرژی می‌باشد. رامانداس و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۰ انتشار امواج لمب در یک چندلایه پادمتقارن متورق را به روش عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قراردادند. آن‌ها نشان دادند امواج لمب به هنگام برخورد با بخش متورق کامپوزیت در هر بخش تورق یافته جداگانه انتشار می‌یابند و شکل مد تغییر می‌کند. بن و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۳ از اولتراسونیک

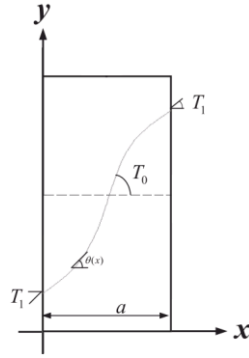
مشخصه‌های موادی به‌صورت تحلیلی ارائه و نتایج به‌دست‌آمده برای چهار نمونه را با نتایج نمونه‌های واقعی مقایسه نمودند. نتایج به‌دست‌آمده از این روش نشان‌دهنده تطابق خوب نتایج تحلیلی با نتایج تجربی داشت. نجد و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۲۲ به ارزیابی المان‌های دوبعدی سینماتیکی متغیر در انتشار امواج لمب در صفحات ایزوتروپ با وصله‌های پیزوالکتریک پرداخته و همگرایی مدل پیشنهادی را در المان‌بندی‌های مختلف و گام‌های زمانی متفاوت بررسی و نتایج به‌دست‌آمده را با روش‌های دقیق موجود مقایسه نمودند. نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش نشان می‌داد استفاده از این روش تا ۵۰ درصد هزینه محاسباتی را با در نظر گرفتن خطای یک درصد کاهش می‌دهد. مردان‌شاهی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۲۲ به بررسی ترک‌های ماتریسی در چندلایه‌های کامپوزیتی از طریق تخمین ضریب میرایی با استفاده از انتشار امواج لمب پرداختند. آن‌ها در این پژوهش نمونه‌های مختلفی از صفحات کامپوزیتی با لایه‌چینی متقاطع را با تراکم ترک‌های مختلف به روش تجربی بررسی و سرعت فاز امواج لمب و ضریب میرایی نمونه‌ها را محاسبه نموده و نتایج به‌دست‌آمده را با روش اجزاء محدود مقایسه و عملکرد مطلوب روش پیشنهادی را تأیید نمودند. بررسی‌ها نشان می‌دهد انتشار امواج لمب در ورق‌های الیاف-فلز سفتی متغیر تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است.

در تحقیق حاضر با استفاده از روش اجزاء محدود به بررسی انتشار امواج لمب در ورق‌های الیاف-فلز سفتی متغیر پرداخته شده است. در ورق‌های فوق با توجه به تغییرات ماتریس سختی در طول و وابستگی پاسخ دینامیکی به ماتریس سختی، پاسخ دینامیکی ورق‌های با الیاف منحنی شکل متفاوت از پاسخ ورق‌های با الیاف پیوسته مستقیم می‌باشد. در این تحقیق اثر تعداد لایه‌های کامپوزیتی، شرایط مرزی، ابعاد ورق و لایه چینی بر نحوه انتشار امواج مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. همچنین جهت بررسی صحت مدل، فرکانس‌های ورق کامپوزیتی سفتی متغیر با چند مرجع مختلف مقایسه شده است.

مبتنی بر انتشار امواج لمب جهت شناسایی موقعیت آسیب در مواد کامپوزیتی استفاده کرده و به روش تجربی و تحلیلی به بررسی اثر پارامترهای مختلف بر حساسیت تشخیص آسیب پرداختند. آن‌ها در این بررسی از دو میله پلاستیکی تقویت‌شده با فیبرهای کربن در دو حالت با آسیب و بدون آسیب استفاده کرده و نتایج به‌دست‌آمده از دو روش را مقایسه نمودند.

سو و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۹ به شناسایی آسیب در کامپوزیت‌ها بر اساس طیف انرژی هیلبرت و الگوریتم توموگرافی امواج لمب پرداخته و بر اساس تفاوت نتایج حاصل‌شده از سازه با و بدون آسیب، ضریب آسیب در سازه‌ها را تعیین نمودند. بررسی آن‌ها نشان می‌داد روش پیشنهادی نسبت به فرآیند سیگنال انعکاسی روش مناسب‌تری بوده و پتانسیل بالایی در شناسایی آسیب در کامپوزیت‌ها دارد. هتو و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۲۰ روش جدیدی جهت شناسایی نقص در کامپوزیت‌ها با استفاده از امواج لمب را پیشنهاد دادند. آن‌ها از روش احتمالی مبتنی بر چهارچوب باثوزین جهت این موضوع استفاده کردند. روش پیشنهادی فوق امکان ایجاد چندین ویژگی حساس به آسیب را برای مجموعه‌ای از سنسورها فراهم می‌کرد. آن‌ها همچنین جهت صحت‌سنجی روش فوق نتایج تجربی حاصل‌شده را با نتایج عددی مقایسه کردند. ازین و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۱ انتشار امواج لمب در ورق کامپوزیتی الکترومگنتوالاستیک را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این بررسی از روش تامسون-هسکل در محاسبه خصوصیات موج در ورق کامپوزیت استفاده کردند و روش فوق را برای ساخت ابزار تست غیر مخرب آکوستیکی بر اساس مواد الکترومگنتوالاستیک پیشنهاد دادند.

ابراهیمی‌نژاد و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۲۲ با بررسی سازه‌های پوشش داده‌شده فولادی دارای پوشش کامپوزیتی با استفاده از امواج لمب را مطالعه نموده و منحنی‌های پراکندگی را برای امواج لمب پادمقارن با در نظر گرفتن ضخامت‌های مختلف و مجموعه‌ای از کاهش‌های



شکل (۲): تغییرات راستای الیاف در یک لایه کامپوزیتی

سفتی متغیر.

مطابق شکل ۲ زاویه الیاف در لبه کناری هر لایه کامپوزیتی T_1 بوده که به مقدار T_0 در وسط ورق می‌رسد. با توجه به تغییرات سفتی به دلیل استفاده از الیاف منحنی شکل، مدل‌سازی ورق‌های الیاف-فلز سفتی متغیر به مراتب پیچیده‌تر از چندلایه‌های با الیاف با زاویه ثابت می‌باشد. در تحقیق حاضر از نرم‌افزار تجاری آباکوس برای این موضوع استفاده و جهت اعمال سفتی متغیر، سازه در راستای طول بخش‌بندی و از لایه‌چینی محلی در المان مطابق با رابطه (۱) بهره گرفته شده است. المان‌های استفاده شده در این پژوهش با توجه به ضخامت ناچیز ورق نسبت به سایر ابعاد آن از نوع S4R و ابعاد $0.01\text{m} \times 0.01\text{m}$ می‌باشد. المان فوق یک المان پوسته‌ای ۴ گره‌ای می‌باشد که در آن برای ورق‌های نازک از فرضیات تئوری کلاسیک بهره گرفته شده است. [۱۷] و از تأثیر برهم‌کنش لایه‌ها صرف‌نظر شده است. ماتریس‌های سفتی در این تئوری از روابط (۲) حاصل می‌گردد [۱۸ و ۱۹]:

$$A(x) = \sum_{k=1}^L \int_{Z_k}^{Z_{k+1}} \bar{Q}_{xy}^{(k)}(x) dz = \sum_{k=1}^L \bar{Q}_{xy}^{(k)}(x) (Z_{k+1} - Z_k)$$

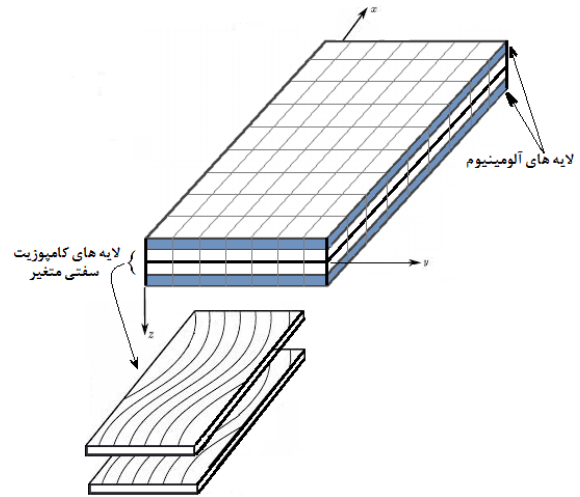
$$B(x) = \sum_{k=1}^L \int_{Z_k}^{Z_{k+1}} \bar{Q}_{xy}^{(k)}(x) z dz = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^L \bar{Q}_{xy}^{(k)}(x) (Z_{k+1}^2 - Z_k^2) \quad (2)$$

$$D(x) = \sum_{k=1}^L \int_{Z_k}^{Z_{k+1}} \bar{Q}_{xy}^{(k)}(x) z^2 dz = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^L \bar{Q}_{xy}^{(k)}(x) (Z_{k+1}^3 - Z_k^3)$$

که در آن $\bar{Q}_{ij}(x)$ بیان‌کننده ماتریس سفتی کاهش یافته در محوره‌های مختصات انتقال یافته، $A(x)$ ماتریس‌های سفتی داخل صفحه، $B(x)$ ماتریس کوپلینگ نیروهای داخل صفحه و خارج صفحه و $D(x)$ ماتریس سفتی نیروهای خارج صفحه می‌باشند که وابسته به $\theta(x)$ هستند. برای حل مسائل دینامیکی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس دو روش ضمنی

۲- مدل‌سازی صفحات سفتی متغیر الیاف-فلز

در این پژوهش به بررسی اثر انتشار امواج لمب در ورق‌های لایه‌ای الیاف-فلز سفتی متغیر متقارن به روش اجزاء محدود پرداخته شده و از لایه‌های با الیاف منحنی شکل استفاده شده است. نمونه‌ای از سازه مورد تحلیل المان‌بندی شده الیاف-فلز سفتی متغیر در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق با شکل، هر المان شامل لایه‌های کامپوزیتی و لایه‌های فلز می‌باشد.



شکل (۱): نمونه‌ای از سازه الیاف-فلز سفتی متغیر

تقسیم‌شده به المان‌های محدود.

جهت این بررسی می‌بایست ابعاد ورق، جنس لایه‌ها، تعداد لایه‌ها، زاویه الیاف در هر نقطه از هر لایه، بار دینامیکی و شرایط مرزی به‌عنوان ورودی مسئله مشخص گردند. الیاف منحنی شکل در هر نقطه از لایه‌های کامپوزیتی ورق الیاف-فلز دارای زاویه مربوط به مختصات آن نقطه بوده که از رابطه تغییر زاویه نسبت به راستای طول حاصل می‌گردد. در این پژوهش تغییرات زاویه فوق برای هر لایه کامپوزیتی مطابق با رابطه (۱) اعمال شده است [۱۶]:

$$\theta(x) = \frac{2(T_1^k - T_0^k)}{a} \left| x - \frac{a}{2} \right| + T_0^k \quad (1)$$

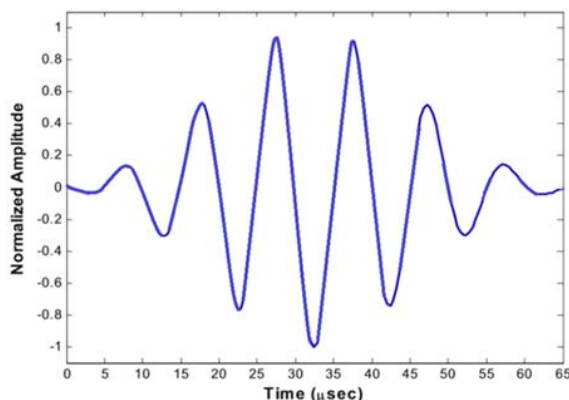
که در آن a برابر طول ورق، T_0^k زاویه جهت‌گیری الیاف در مرکز ورق و T_1^k زاویه جهت‌گیری الیاف در ابتدا و انتهای ورق ($x=0, a$) می‌باشند. تغییرات فوق برای یک لایه کامپوزیتی سفتی متغیر در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول (۱): نتایج حاصل از اعتبارسنجی.

روش مورد استفاده	فرکانس اول (Hz)	فرکانس دوم (Hz)	فرکانس سوم (Hz)
RRM [۲۱]	۳۰۹/۴۸۷	۵۰۵/۱۷۸	۸۴۸/۳۳۸
CLT IGA [۱۶]	۳۰۹/۳۱۵	۵۰۴/۷۹۱	۸۴۷/۷۴۸
HLT [۲۲]	۳۰۸/۷۹۹	۵۰۳/۷۹۹	۸۴۵/۵۰۹
روش حاضر	۲۹۹/۶	۴۸۹/۰۸	۸۳۵/۶۴
خطا (%)	۳/۱۹	۳/۱۸	۱/۴۹

جدول (۲): دامنه نیرو [۱۹].

دامنه	زمان (میکروثانیه)
۰	۰
-۰/۰۳	۳
۰/۱	۸
-۰/۳	۱۳
۰/۵	۱۷/۵
-۰/۷	۲۲
۰/۹۳	۲۷
-۱	۳۲
۱	۳۷
-۰/۷	۴۲
۰/۵	۴۷
-۰/۲	۵۲
۰/۱	۵۷
-۰/۰۴	۶۲
۰	۶۵



شکل (۳): نمودار تغییرات دامنه بی‌بعد نیرو نسبت به زمان

[۱۹].

و صریح ارائه شده است که در این تحقیق برای حل از روش صریح استفاده شده است. نرم‌افزار در این روش از قانون تفاضل مرکزی در حل استفاده می‌کند.

۳- ارائه نتایج

مشخصات کامپوزیت و آلومینیوم در این پژوهش به شرح زیر در نظر گرفته شده است.

خواص و مشخصات لایه‌های کامپوزیتی به شرح زیر است [۱۶]:

$E1=173 \text{ GPa}$, $E2=7.2 \text{ GPa}$, $G12=3.76 \text{ GPa}$,

$\nu_{12}=0.29$, $\rho=1540 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

خواص و مشخصات لایه‌های آلومینیومی (Al 2024-T3) به شرح زیر است [۲۰]:

$E=72.4 \text{ GPa}$, $\nu_{12}=0.33$, $\rho=2700 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

همچنین لایه‌چینی‌های در نظر گرفته شده در این پژوهش عبارتند از:

الف) $[Al, <0, 45>, Al]$

ب) $[Al, <0, 45>, Al, <0, 45>, Al]$

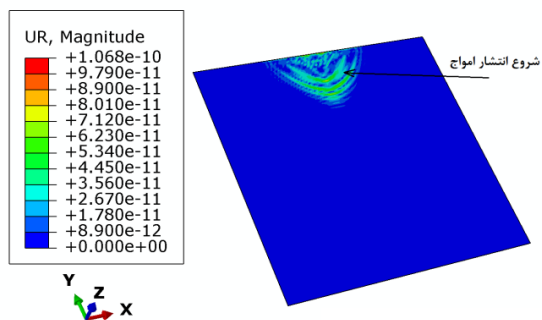
در این تحلیل در گام اول جهت اعتبارسنجی مدل مورد تحلیل، فرکانس‌های طبیعی ورق با مراجع [۱۶] و [۲۱-۲۲] مورد مقایسه قرار گرفته است. در سه مرجع فوق جهت محاسبه فرکانس صفحات به ترتیب از روش اجزاء محدود ایزوژئومتریک توسعه داده شده بر مبنای تئوری کلاسیک صفحات، روش ریلی‌ریترز مبتنی بر تئوری کلاسیک و از روش اجزاء محدود مرتبه بالای p-version استفاده شده است. مطابق با مراجع فوق، ابعاد ورق $a=b=1\text{m}$ ، ضخامت کل ورق برابر $h=0.01\text{m}$ و چهار طرف ورق تکیه‌گاه ساده در نظر گرفته شده است. لایه‌چینی کامپوزیت سفتی متغیر در این اعتبارسنجی به صورت زیر می‌باشد:

$[<30, 0>, <45, 90>, <30, 0>]$

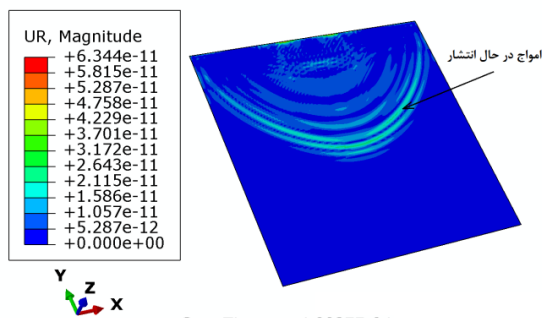
نتایج حاصله و درصد اختلاف بین نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، روش حاضر سفتی سازه را کمی کمتر تقریب می‌زند.

میزان نیروی وارد شده در این تحقیق برابر $F=0/0001 \text{ (N)}$ بوده و مطابق با دامنه ذکر شده در جدول ۲ و شکل ۳ و از وسط یکی از لبه‌های ورق اعمال شده است.

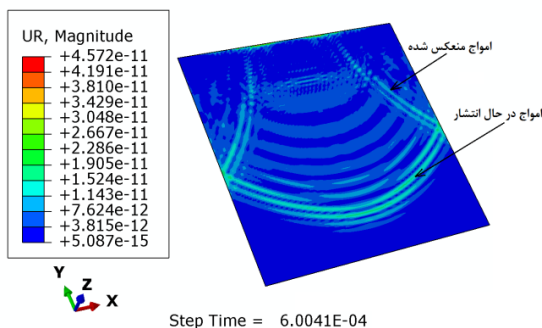
منعکس و حالت انتشار یکنواخت موج تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین در شکل ۵ نتایج به دست آمده برای یک ورق مشابه با شرایط مرزی چهار طرف تکیه‌گاه گیردار (CCCC) ارائه شده است. مقایسه نتایج به دست آمده برای صفحات با شرایط مرزی SSSS و CCCC نشان می‌دهد، انتشار امواج لمب تحت تأثیر شرط مرزی ورق بوده و هرچه تعداد قیدهای ورق کمتر باشد، انتشار امواج حالت نرم‌تری داشته و دامنه‌ها بزرگ‌تر خواهند بود.



(الف)



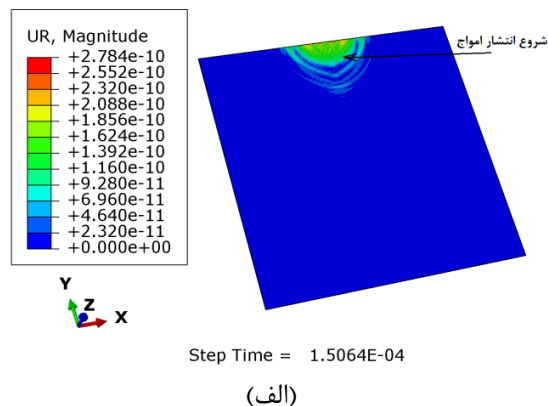
(ب)



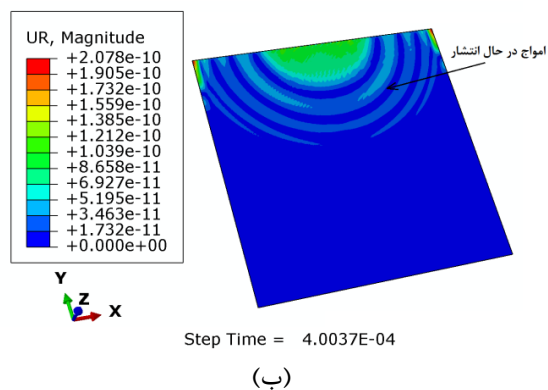
(ج)

شکل (۵): انتشار امواج لمب در یک ورق الیاف-فلز سفتی متغیر سه لایه با شرایط مرزی CCCC در سه زمان مختلف با ابعاد $1m \times 1m$.

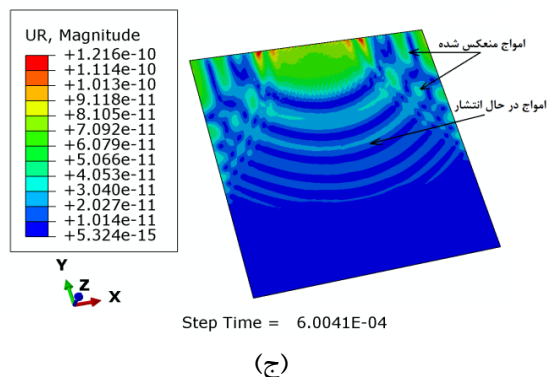
نتایج حاصل از نحوه انتشار امواج لمب در ورق‌های الیاف-فلز چندلایه در اشکال ۴ تا ۱۲ ارائه شده است. در شکل ۴ نتایج انتشار امواج لمب برای یک ورق با ابعاد ۱ متر در ۱ متر سه لایه با شرایط مرزی چهار طرف تکیه‌گاه ساده (SSSS) ارائه شده است.



(الف)



(ب)



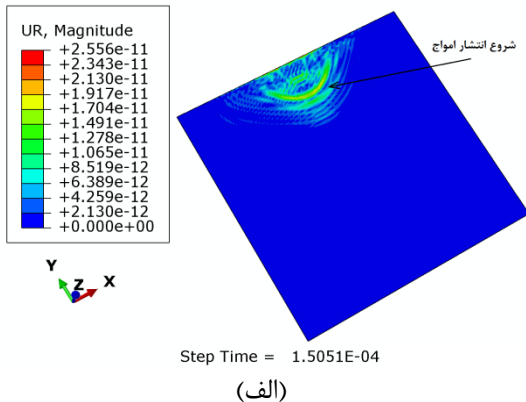
(ج)

شکل (۴): انتشار امواج لمب در یک ورق الیاف-فلز سفتی متغیر سه لایه با شرایط مرزی SSSS در سه زمان مختلف با ابعاد $1m \times 1m$.

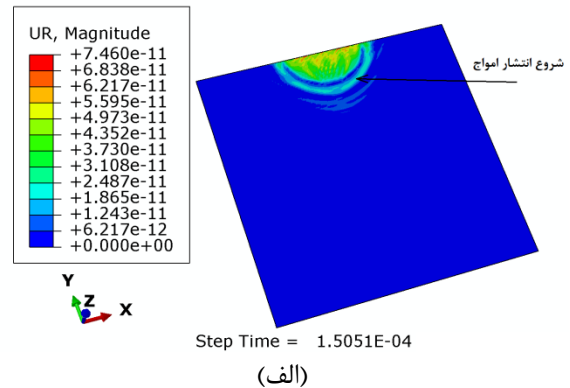
نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در لحظات ابتدایی، موج تنها در حال انتشار بوده و پس از برخورد به لبه‌های ورق

افزایش تعداد لایه‌ها در مقایسه با ورق مشابه با تعداد لایه کمتر کاهش می‌یابد.

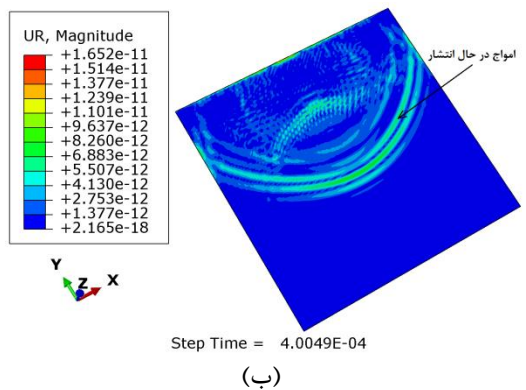
مقایسه نتایج همچنین نشان می‌دهد سرعت انتشار امواج با تغییر شرط مرزی کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد.



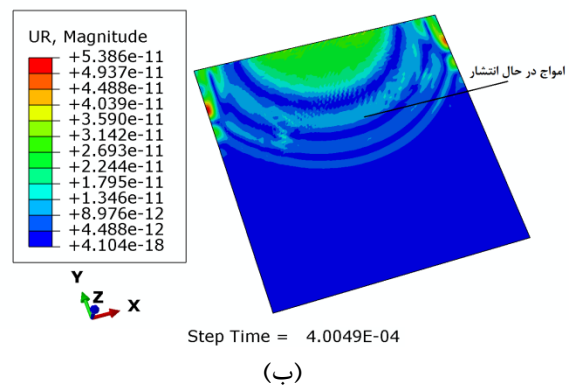
(الف)



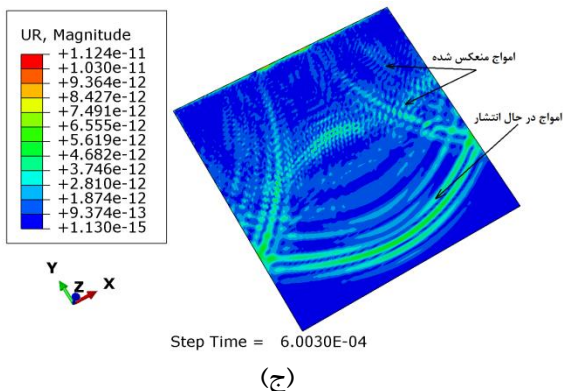
(الف)



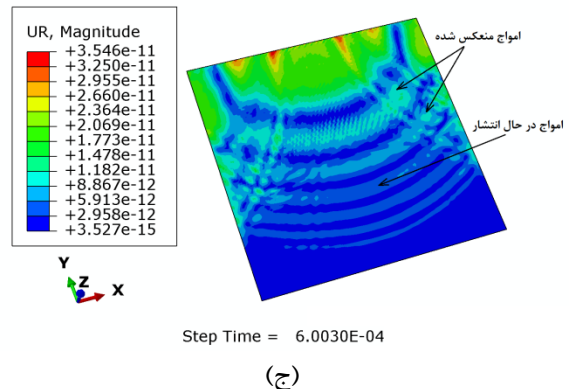
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

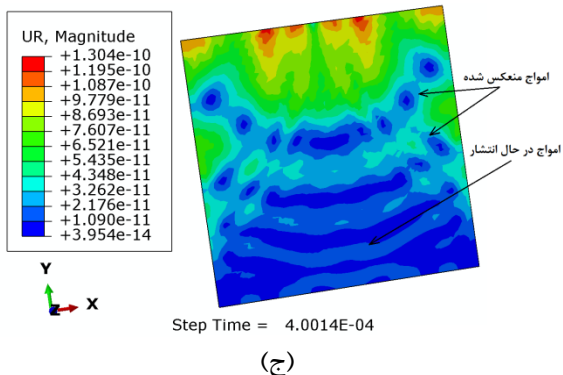
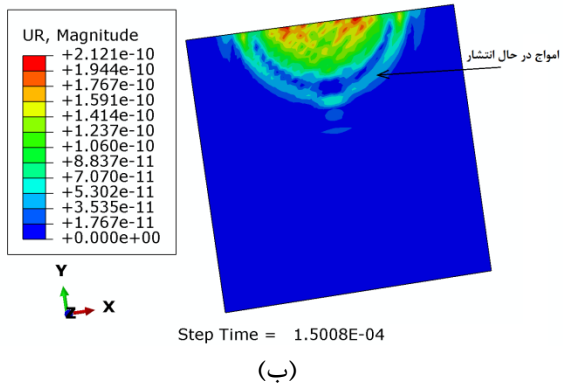
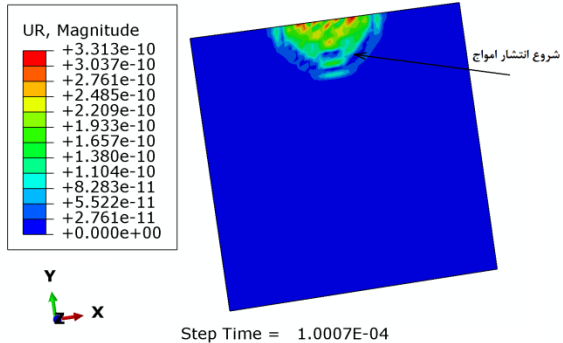
شکل (۷): انتشار امواج لمب در یک ورق الیاف-فلز سفتی متغیر پنج لایه با شرایط مرزی CCCC در سه زمان مختلف با ابعاد $1m \times 1m$.

شکل (۶): انتشار امواج لمب در یک ورق الیاف-فلز سفتی متغیر پنج لایه با شرایط مرزی SSSS در سه زمان مختلف با ابعاد $1m \times 1m$.

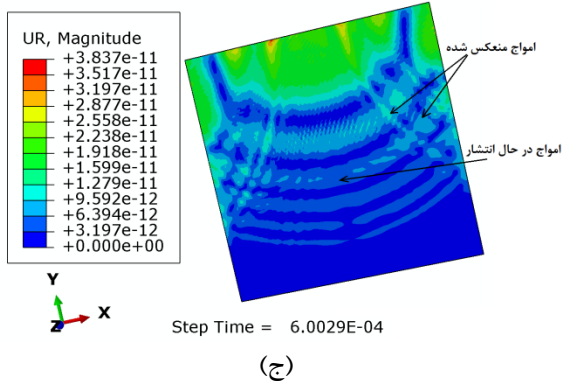
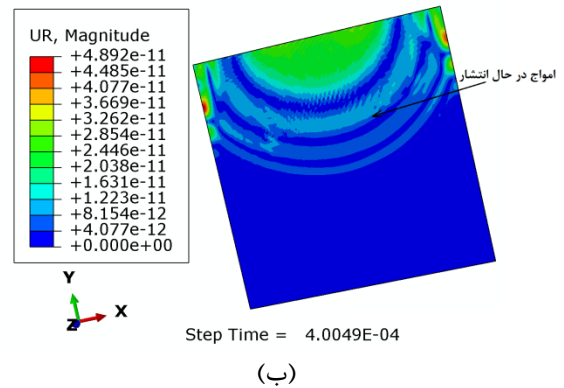
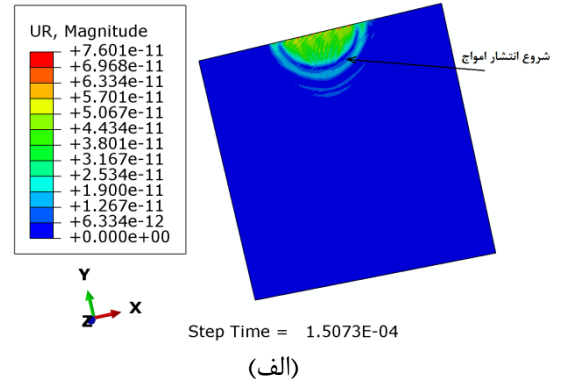
نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۷ برای ورق مشابه با شرایط مرزی CCCC نیز نشان می‌دهد، افزایش تعداد قیدهای ورق به همراه افزایش تعداد لایه‌ها باعث کاهش بیشتر دامنه امواج انتشاری می‌گردد.

در شکل ۶ انتشار امواج لمب در یک ورق الیاف-فلز سفتی متغیر متقارن ۵ لایه با شرایط مرزی SSSS با حفظ ضخامت هر لایه نسبت به صفحات سه لایه ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد انتشار امواج لمب متأثر از افزایش تعداد لایه‌ها بوده و با حفظ شدت موج، میزان دامنه با

SSSS، CCCC و FFFF برای صفحات پنج لایه نشان می‌دهد سرعت انتشار امواج کمتر تحت تأثیر شرایط مرزی می‌باشد. همچنین در شکل ۹ انتشار امواج لمب در یک ورق الیاف-فلز سفتی متغیر سه لایه با شرایط مرزی SSSS و ابعاد 0.5×0.5 متر در 0.5 متر ارائه شده است. نتایج به دست آمده برای ورق فوق نشان می‌دهد، با کاهش ابعاد قطعه، امواج خیلی سریع‌تر به لبه‌های ورق رسیده و منعکس می‌شوند.

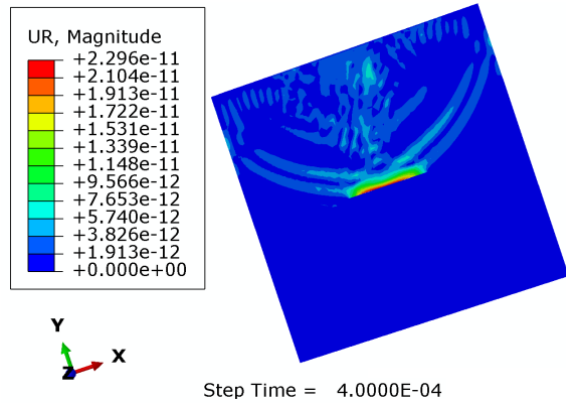


شکل (۹): انتشار امواج لمب در یک ورق الیاف-فلز سفتی متغیر سه لایه با شرایط مرزی SSSS در سه زمان مختلف با ابعاد $0.5m \times 0.5m$.

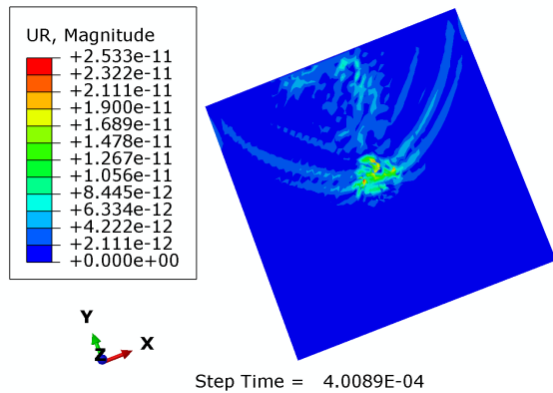


شکل (۸): انتشار امواج لمب در یک ورق الیاف-فلز سفتی متغیر پنج لایه با شرایط مرزی FFFF در سه زمان مختلف با ابعاد $1m \times 1m$.

در شکل ۸ نتایج انتشار امواج لمب برای ورق با شرایط مرزی آزاد (FFFF) ارائه و جهت جلوگیری از واگرایی حل، در موقعیت (0.5 ، 0.75) همه درجات آزادی ورق بسته شده است. نتایج به دست آمده برای این شرایط مرزی در مقایسه با شرایط مرزی SSSS و CCCC نشان‌دهنده افزایش دامنه‌ها نسبت به دو شرط مرزی فوق می‌باشد. همچنین بررسی انتشار امواج در گام‌های زمانی مختلف در سه شرط مرزی

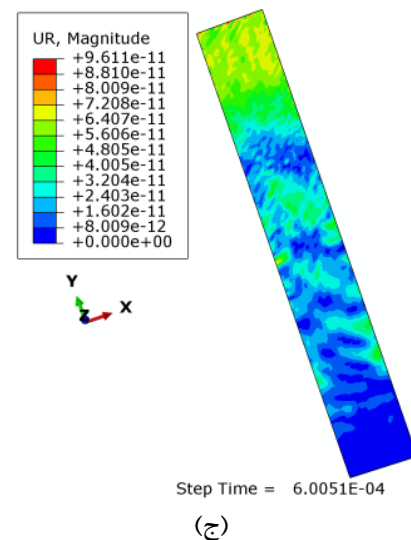
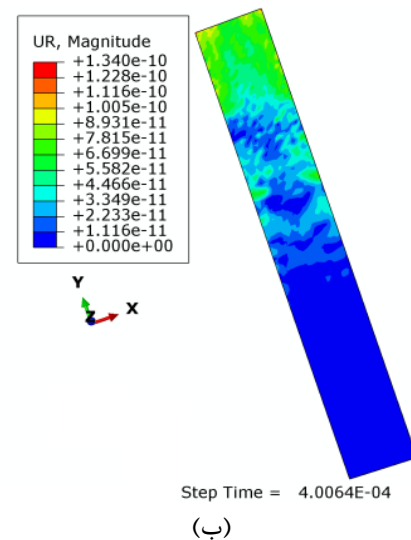
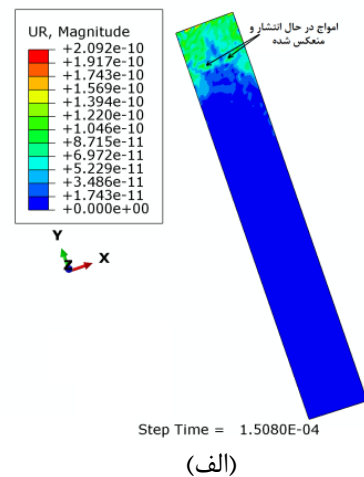


شکل (۱۱): برخورد امواج لمب به ترک مرکزی به طول 0.3m در یک ورق الیاف-فلز سفتی متغیر پنج لایه با شرایط مرزی CCCC.



شکل (۱۲): برخورد امواج لمب به تورق دایروی مرکزی بین لایه‌های دوم و سوم به شعاع 0.1m در یک ورق الیاف-فلز سفتی متغیر پنج لایه با شرایط مرزی CCCC.

در شکل ۱۰ انتشار امواج لمب در یک نوار باریک به ابعاد ۰/۱۵ متر در ۱ متر برای شرایط مرزی چهار طرف آزاد (FFFF) ارائه شده است و جهت جلوگیری از واگرایی حل همه درجات آزادی ورق در موقعیت (۰/۷۵، ۰/۰۷۵) بسته شده است. نتایج فوق نشان می‌دهد با توجه به سرعت انتشار امواج و عرض ناچیز نوار، امواج سریع به لبه‌های ورق برخورد کرده و منعکس می‌گردند و از حالت یکنواخت خارج شده و در صورت وجود نقص در سازه، شناسایی آن را دشوار می‌کند. لذا استفاده از روش فوق در صفحات با عرض ناچیز چندان مؤثر نخواهد بود. در اشکال ۱۱ و ۱۲ نیز به ترتیب اثرات برخورد امواج لمب به ترک مرکزی تمام عمق به طول ۰/۳ متر و تورق دایروی مرکزی بین لایه‌های دوم و سوم به شعاع ۰/۱ متر در یک ورق پنج لایه الیاف-فلز سفتی



شکل (۱۰): انتشار امواج لمب در یک ورق الیاف-فلز سفتی متغیر پنج لایه با شرایط مرزی FFFF در سه زمان مختلف با ابعاد 0.15m × 1m.

development. Journal of intelligent material systems and structures. 2005;16(2):97-111.

[5] Su Z, Ye L. Lamb wave-based quantitative identification of delamination in CF/EP composite structures using artificial neural algorithm. Composite Structures. 2004;66(1-4):627-637.

[6] Yashiro S, Takatsubo J, Toyama, N. An NDT technique for composite structures using visualized Lamb-wave propagation. Composites Science and Technology. 2007;67(15-16):3202-3208.

[7] Rhee SH, Lee JK, Lee JJ. The group velocity variation of Lamb wave in fiber reinforced composite plate. Ultrasonics. 2007;47(1-4):55-63.

[8] Ramadas C, Balasubramaniam K, Joshi M, Krishnamurthy CV. Interaction of guided Lamb waves with an asymmetrically located delamination in a laminated composite plate. Smart Materials and Structures. 2010;19(6):065009.

[9] Ben BS, Ben BA, Vikram KA, Yang SH. Damage identification in composite materials using ultrasonic based Lamb wave method. Measurement. 2013;46(2):904-912.

[10] Su C, Jiang M, Liang J, Tian A, Sun L, Zhang L, Zhang F, Sui Q. Damage identification in composites based on Hilbert energy spectrum and Lamb wave tomography algorithm. IEEE Sensors Journal. 2019;19(23):11562-11572.

[11] Huo H, He J, Guan X. A Bayesian fusion method for composite damage identification using Lamb wave. Structural Health Monitoring. 2020;1475921720945000.

[12] Ezzin H, Wang B, Qian Z, Arefi M. Multiple crossing points of Lamb wave propagating in a magneto-electro-elastic composite plate. Archive of Applied Mechanics. 2021;91(6):2781-2793.

[13] Ebrahiminejad A, Mardanshahi A, Kazemirad S. Nondestructive evaluation of coated structures using Lamb wave propagation. Applied Acoustics. 2022;185:108378.

[14] Najd J, Zappino E, Carrera E, Harizi W, Aboura Z. A Variable Kinematic Multifield Model for the Lamb Wave Propagation Analysis in Smart Panels. Sensors. 2022;22(16):6168.

[15] Mardanshahi A, Shokrieh MM, Kazemirad S. Simulated Lamb wave propagation method for nondestructive monitoring of matrix cracking in laminated composites. Structural Health Monitoring. 2022;21(2):695-709.

متغیر ارائه شده است. نتایج فوق نشان‌دهنده تغییر شکل امواج لمب و انعکاس آن‌ها در برخورد با نقص‌های سازه می‌باشد. در مجموع مطابق با نتایج به دست آمده، می‌توان از امواج فوق در شناسایی نقص در اکثر سازه‌های سفتی متغیر الیاف-فلز استفاده نمود.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر انتشار امواج لمب در صفحات الیاف-فلز سفتی متغیر تحت شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نتایج نشان می‌دهد، انتشار امواج لمب تحت تأثیر شرط مرزی ورق بوده و هرچه تعداد قیدهای ورق کمتر باشد، انتشار امواج حالت نرم‌تری داشته و دامنه‌ها بزرگ‌تر خواهند بود. در مقابل، با افزایش تعداد لایه‌ها و با افزایش سفتی سازه، دامنه امواج انتشاری کاهش می‌یابد. از طرفی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، سرعت انتشار امواج کمتر تحت تأثیر شرایط مرزی ورق می‌باشد. همچنین با کاهش ابعاد ورق، امواج سریع‌تر به لبه‌های ورق برخورد کرده و در زمان کوتاه‌تری انعکاس می‌یابند که این امر در صفحات با عرض ناچیز و دارای نقص، شناسایی نقص در سازه‌ها را دشوار می‌کند. بررسی ماهیت این امواج در کل نشان می‌دهد، با توجه به انعکاس امواج برخوردی به لبه‌ها و نقص‌های موجود در سازه، می‌توان از این روش در شناسایی وجود نقص در سازه بهره برد.

۵- مراجع

[1] Al-Nassar Y, Datta S, Shah A. Scattering of Lamb waves by a normal rectangular strip weldment. Ultrasonics. 1991;29(2):125-132.

[2] Alleyne DN, Cawley P. The interaction of Lamb waves with defects. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 1992;39(3):381-397.

[3] Kessler SS, Spearing SM, Soutis C. Damage detection in composite materials using Lamb wave methods. Smart materials and structures. 2002;11(2):269-278.

[4] Su Z, Ye L. Lamb wave propagation-based damage identification for quasi-isotropic CF/EP composite laminates using artificial neural algorithm: Part I-methodology and database

- [20] Rice RC. Metallic materials properties development and standardization (MMPDS). National Technical Information Service. 2003.
- [21] Khalafi V, Fazilati J. Supersonic flutter analysis of curvilinear fiber variable stiffness composite laminated plates. 5th International Conference on Composites: Characterization, Fabrication and Application, CCFA-5. 2016.
- [22] Akhavan H, Ribeiro P. Natural modes of vibration of variable stiffness composite laminates with curvilinear fibers. *Composite Structures*. 2011;93(11):3040-3047.
- [23] Han S, Palazotto AN, Leakeas CL. Finite-element analysis of Lamb wave propagation in a thin aluminum plate. *Journal of Aerospace Engineering*. 2009;22(2):185-197.
- [16] Khalafi V, Fazilati J. Free vibration analysis of variable stiffness composite laminated thin skew plates using IGA. *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*. 2018;4(2):171-188.
- [17] ABAQUS (2021) ABAQUS analysis user's manual. Version 2021. Dassault Systemes Simulia Corp
- [18] Ghashochi.Bargh H, Sadr MH. PSO algorithm for fundamental frequency optimization of fiber metal laminated panels. *Structural Engineering and Mechanics*, 2013;47(5):713-727.
- [19] Chen J, Dawe DJ. Linear transient analysis of rectangular laminated plates by a finite strip-mode superposition method. *Composite structures*. 1996;35(2):213-228.



Investigation of Lamb Waves Propagation in Variable Stiffness Fiber Metal Laminated Plates Using Finite Element Method

Hadi Ghashochi-Bargh^{1*}, Melina Hasani²

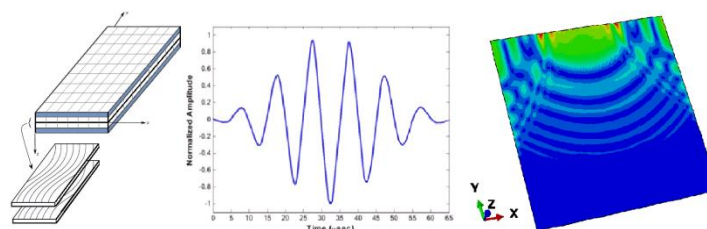
¹ Assistant Professor, Department of Industrial, Mechanical, and Aerospace Engineering, Buein Zahra Technical University, Buein Zahra, Iran

² B.Sc., Department of Industrial, Mechanical, and Aerospace Engineering, Buein Zahra Technical University, Buein Zahra, Iran

HIGHLIGHTS

- Lamb wave propagations in variable stiffness fiber-metal plates are studied using the finite element method.
- The effects of the number of layers, plate dimensions, and boundary conditions on the propagation of lamb waves are investigated.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 2 September 2022

Received in revised form: 16 September 2022

Accepted: 22 October 2022

Available online: 12 December 2022

*Correspondence:

ghashochi.b@bzte.ac.ir

How to cite this article:

H. Ghashochi-Bargh, M. Hasani. Investigation of lamb waves propagation in variable stiffness fiber metal laminated panels using finite element method. Journal of Aerospace Mechanics. 2023; 19(1):81-92.

Keywords:

Lamb waves

Fiber-metal laminated plates

Variable stiffness laminated plates

Finite element method

ABSTRACT

Lamb waves are mechanically guided waves that propagate through plates and shells, and their speed depends on the frequency. Nowadays, researchers use these waves to detect defects in structures. This is due to the properties of Lamb waves that can propagate in the whole structure, and are quickly affected if there is a defect. Using this method instead of traditional methods due to their complexity, cost and time are desired. As an innovation in this research, the effects of lamb wave propagations in symmetrically variable stiffness fiber-metal laminated plates are investigated and for this purpose, the finite element method is used. In this analysis, curvilinear fibers are used in the composite layers instead of the straight fibers, and the effect of the number of layers, plate dimensions, and boundary conditions on the propagation of the mentioned waves are investigated. Also, to check the validity, the first three frequencies of the structure are compared with several different references. The obtained results show that the Lamb waves are propagated along the length of the plate and are reflected by hitting the boundaries of the plate or defect in the structure and lose their uniform propagation state. Based on this investigation, this method can be used to detect the defect in variable stiffness fiber-metal laminated structures.

