

تشخیص خرابی در ورق‌های کامپوزیتی با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال امواج لمب

محمد ریاحی

استاد دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه علم و صنعت ایران

riahi@iust.ac.ir

علیرضا احمدی *

کارشناس ارشد مهندسی مکانیک

مرکز آزمونهای غیرمخرب دانشگاه علم و صنعت ایران

research@alireza-ahmadi.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۱۳

چکیده

ابداع روش‌های نوین و کارآمد برای تشخیص صحیح و بهنگام خرابی در ورق‌های چندلایه کامپوزیتی ناشی از عواملی مانند ضربه یا برخورد اشیاء که منجر به ایجاد عیوبی نظیر شکاف، سوراخ یا جدایش بین لایه‌ای می‌گردد، همراه با افزایش استفاده از مواد مذکور به علت مزایای زیاد، از جمله استحکام ویژه بالا، مقاومت در برابر خستگی و خوردگی و همچنین سبکی، در محافل علمی و صنعتی بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

در پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از امواج فراصوت هدایت شده (امواج لمب) با حساسیت مناسب به خرابی-هایی با اندازه و شدت کم، نسبت به ایجاد یک سامانه شناسایی خرابی در ورق کامپوزیتی از جنس پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه اقدام گردیده و تاثیر ابعاد خرابی بر مشخصات موج منتشر در سازه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد، با ایجاد ارتباط میان تغییرات دامنه امواج منتشره در سازه (کاهش ۱۵ تا ۳۷ درصدی) به علت افزایش ابعاد خرابی (بزرگتر شدن تدریجی قطر سوراخ تا چهار برابر و در سه مرحله)، علاوه بر امکان شناسایی و تشخیص خرابی می‌توان به تخمین شدت آن با دقت مناسب مبادرت نمود.

واژگان کلیدی: آزمون‌های غیرمخرب، امواج فراصوت هدایت شده، امواج لمب، ورق کامپوزیتی، تبدیل موجک

۱. مقدمه

مواد کامپوزیتی دارای مزایای فراوانی از قبیل بهبود استحکام، سفتی، خستگی، مقاومت به ضربه و مقاومت در برابر خوردگی هستند. مدول ویژه و استحکام ویژه در کامپوزیت‌ها بسیار بالاست. برای مثال استحکام کامپوزیت

تک جهته گرافیت/اپوکسی می‌تواند مشابه فولاد باشد اما استحکام ویژه آن سه برابر فولاد است که این موضوع می‌تواند به معنای کاهش وزن سازه کامپوزیتی در عین حفظ استحکام آن باشد. کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده

با الیاف شیشه کاربرد فراوانی در صنایع مختلف از جمله ساخت سازه‌های عمرانی، سازه‌های دریایی و هوافضایی دارد. امروزه بخش‌هایی از بدنه دو هواپیمای مدرن بوئینگ ۷۸۷ و ارباس ۳۸۰ از این نوع کامپوزیت تولید می‌شود [۱].

با وجود کاربرد فراوان و رو به رشد مواد کامپوزیتی در مصارف گوناگون صنعتی، سازه‌های کامپوزیتی بالاخص در صنایع مهم و حساس نظیر هوافضا و سازه‌های عمرانی باید کاملاً تحت پایش و مراقبت باشند. هر چند سازه‌های کامپوزیتی مزایای فراوانی دارند لیکن به هنگام رخداد خرابی، تقریباً بدون نشانه و هشدار خاصی، به شکل فاجعه آمیزی دچار شکست می‌شوند. آسیب‌های ناشی از برخورد اجسام که منجر به خرابی‌هایی از نوع شکاف یا سوراخ می‌شوند، گونه‌ای از عیوب در مواد کامپوزیتی است که در صورت عدم انجام اقدامات موثر در حوزه تعمیرات و نگهداری، در سازه آسیب دیده گسترش یافته و می‌تواند به از هم گسیختگی کامل سازه کامپوزیتی منجر شود [۲].

نظر به محدودیت‌های موجود در اجرای روش‌های معمول ارزیابی غیرمخرب^۱، از قبیل عدم کارایی مناسب در شناسایی برخی عیوب به خصوص در مواد کامپوزیتی به دلیل ساختار پیچیده و غیرهمسانگرد^۲، نیاز به روش‌های نوین بیش از پیش احساس می‌شود. به عنوان مثال لزوم امکان دسترسی مستقیم به ناحیه تحت بازرسی در روش‌های ارزیابی غیرمخرب و از آنجا که این امر تنها در زمان انجام عملیات نگهداری و تعمیرات با خارج شدن سازه از حالت عملیاتی امکان پذیر است، انجام بازرسی‌های مداوم و مستمر، مبتنی بر آزمون‌های غیرمخرب متداول از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود [۳].

پایش سلامت سازه‌ای^۳، جایگزینی جدید و خلاقانه برای روش‌های معمول ارزیابی غیرمخرب است که باعث اطمینان از عدم وجود عیوب در سازه می‌شود، هر چند اصول و مبانی پایش سلامت سازه‌ای بر پایه ارزیابی‌های غیرمخرب بنا شده است. در واقع بسیاری از روش‌های

مبتنی بر پایش سلامت سازه‌ای با تبدیل ارزیابی غیرمخرب با استفاده از ابزارهای نوین نظیر محرک‌ها، سنسورها، نرم افزارهای هوشمند و انواع پردازش‌های رایانه‌ای، قابل تبدیل به روش‌های پایش سلامت سازه‌ای می‌باشند [۴].

از میان روش‌های مختلف طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های مبتنی بر پایش سلامت سازه‌ای، استفاده از امواج فراصوت هدایت شده در سال‌های اخیر به خصوص در پایش سلامت سازه‌های ورقی کامپوزیتی، رشد چشمگیری داشته است. در این رهیافت با وجود روش‌های مختلف ارسال و دریافت امواج مذکور، استفاده از میدل‌های پیزوالکتریک^۴ به دلیل وزن سبک و قیمت مقرون به صرفه در کنار سهولت استفاده، راهکاری مناسب و روبه توسعه است [۵و۶].

در این پژوهش امواج فراصوت هدایت شده به کمک میدل‌های پیزوالکتریک با نقش دوگانه محرک و سنسور در یک ورق ۸ لایه از جنس پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه منتشر گردیده و در هر دو حالت سالم و معیوب، سیگنال امواج از سازه دریافت شده است. مقایسه این دو سیگنال با یکدیگر و مشاهده کاهش دامنه و سطح انرژی امواج در حوزه تبدیل موجک، نشانه مناسبی برای تشخیص پیدایش خرابی در سازه است. در ادامه تحقیق، با افزایش تدریجی قطر سوراخ در سه مرحله و پردازش سیگنال امواج، اقدام به ایجاد ارتباط عددی میان میزان کاهش دامنه امواج منتشر شده با میزان افزایش شدت خرابی (قطر سوراخ) گردید.

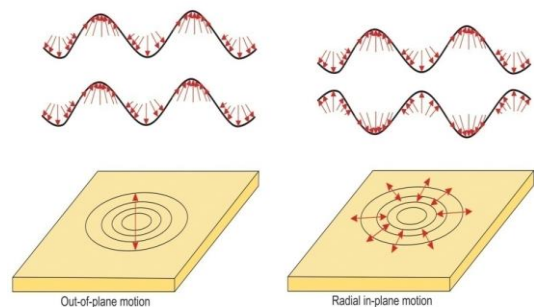
ایجاد یک سامانه پایش سلامت سازه‌ای برای مواد کامپوزیتی مبتنی بر امواج لمب به عنوان جایگزین مناسب برای امواج فراصوت معمولی در حوزه آزمون‌های غیرمخرب و قابلیت تعمیر نتایج حاصل از ایجاد ارتباط عددی میان تغییرات موج منتشر شده در سازه با شدت خرابی به منظور توسعه روشی برای شناسایی و تعیین شدت خرابی‌های نامعلوم در سازه‌های مشابه، از ویژگی‌های این تحقیق است.

۲. اصول، مبانی و تئوری تحقیق

امواج لمب^۵ به عنوان نوعی از امواج فراصوت هدایت شده در سازه‌های ورقی، محسوب شده که قادر به حرکت در سازه‌های نازک، با دو سطح آزاد موازی هستند. این امواج در امتداد مرز سازه حرکت کرده و در واقع مرز سازه، حرکت این امواج را هدایت می‌کند که به همین دلیل به این امواج، هدایت شده می‌گویند.

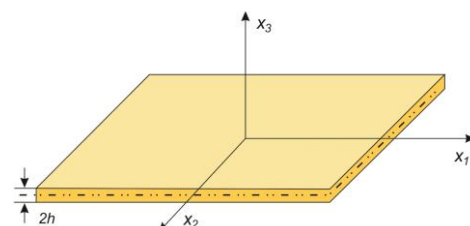
امواج لمب، به واقع اغتشاشات الاستیک در یک ورق جامد، با شرایط آزاد مرزی است که بر حسب مودهای انتشار به متقارن و نامتقارن تقسیم می‌گردد. مود متقارن با نماد S_i و مود نامتقارن با نماد A_i شناخته شده که اندیس آن مربوط به مرتبه مود مذکور می‌باشد.

به عنوان مثال مطابق شکل ۱ دو مود بسیار پرکاربرد که اصطلاحاً مودهای مرتبه صفر یا مودهای پایه شناخته می‌شوند با نمادهای A_0 و S_0 تعریف می‌شوند.



شکل ۱. مودهای متقارن (راست) و نامتقارن (چپ) امواج لمب

در یک ورق نازک همگن و همسانگرد، شبیه آنچه در شکل ۲ نمایش داده شده است، امواج لمب، صرفنظر از مود مربوطه، در قالب تانسوری در مختصات کارتزین به صورت زیر قابل توصیف هستند:



شکل ۲. انتشار امواج لمب در ورق نازک با ضخامت $2h$

$$\mu \cdot u_{i,jz} + (\mu + \lambda) \cdot u_{j,ji} + \rho \cdot f_i = \rho \cdot \ddot{u}_i \quad (1)$$

$(i,j=1,2,3)$

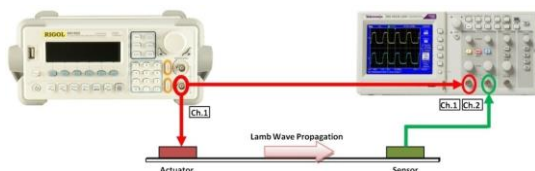
که در معادله فوق، u_i و f_i به ترتیب تغییر مکان و نیرو در جهت X_i بوده و همچنین ρ چگالی و μ مدول برشی ورق هستند و ضمناً λ ثابت لامه است. با انجام محاسبات و حل معادلات، درنهایت می‌توان معادله فوق را به دو بخش مجزا مربوط به مودهای متقارن و نامتقارن تجزیه کرد.

از این معادلات برای ترسیم نمودارهای پراکندگی^۶ که در واقع گام اول، برای تعیین پارامترهای طراحی آزمایش هستند استفاده خواهد شد. لازم به ذکر است با انجام تغییراتی در این معادلات می‌توان با تقریب و دقت مناسبی به ورق‌های چند لایه نیز تعمیم داد [۷].

$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = - \frac{4k^2 qp}{(k^2 - q^2)^2}$	برای مودهای متقارن
(۲)	
$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = - \frac{(k^2 - q^2)^2}{4k^2 qp}$	برای مودهای نامتقارن

۳. طراحی و پیکربندی آزمایش

هدف از این پژوهش طراحی و ساخت سامانه پایش سلامت سازه‌ای در ورق کامپوزیتی از جنس پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه^۷ می‌باشد که به دلیل وجود یک خرابی (سوراخ) در آن دچار آسیب شده بود. الیاف مورد نیاز برای ساخت نمونه‌ها از جنس الیاف شیشه تک جهته بوده و رزین استفاده شده از نوع اپوکسی بیسفنول که با نسبت حدود ۱۴٪ با ماده سفت کننده ترکیب گردید. لایه چینی ورق به صورت $[0/-45/45/90]_s$ در ۸ لایه و در نتیجه شبه همسانگرد^۸ انتخاب شد که منجر به تولید ورقی با ضخامت نهایی حدود ۲ میلی‌متر گردید.



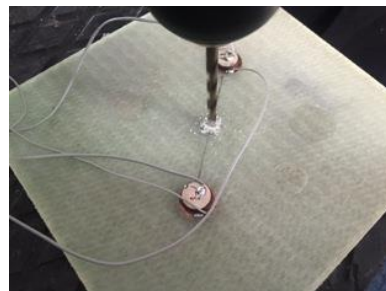
شکل ۴. تصویر شماتیک پیکربندی آزمایش

جهت ایجاد پالس تحریک از یک دستگاه فانکشن ژنراتور از نوع ریگول DG 1022 استفاده شد. ایجاد چند نوع شکل موج متنوع و حتی ایجاد شکل موج دلخواه با محدوده فرکانسی یک میکروهرتز تا ۲۰ مگاهرتز، ایجاد دامنه تحریک حداکثر ۲۰ ولت نقطه به نقطه، امکان اتصال حافظه فلش، دو کانال خروجی مجزا، امکان اتصال به آمپلی فایر و نیز وجود کلید برست در پنل آن از مزایای این دستگاه می باشد. برای مشاهده، دیجیتالی کردن و ذخیره سازی سیگنال های مربوط به امواج لمب که توسط سنسورها از ورق کامپوزیتی دریافت می شوند، از یک دستگاه اسیلوسکوپ دیجیتالی از نوع تک ترونیکس TDS 1012C-SC با پهنای باند ۴۰ مگاهرتز، نرخ نمونه برداری یک گیگا سیمپل بر ثانیه، دارای دو کانال، قابلیت برنامه ریزی و کنترل از طریق رایانه استفاده شد. پیکربندی نهایی آزمایش در شکل ۵ قابل مشاهده است.



شکل ۵. پیکربندی و اتصال نمونه به تجهیزات آزمایشگاهی

مطابق شکل ۳ چهار نمونه از ورق در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران به روش تزریق درخلاق ساخته شد که در نهایت یکی از ورق ها با کیفیت ساخت بهتر با ابعاد مربعی ۱۵۰ میلی متر برای انجام آزمایش انتخاب گردید.



شکل ۳. ایجاد خرابی در نمونه برای انجام آزمایش

در این آزمایش با ایجاد سوراخ و افزایش قطر آن در سه مرحله به ابعاد ۲، ۶ و ۸ میلی متر و عمق ۱/۵ میلی متر اقدامات لازم برای شناسایی سوراخ از طریق بررسی تغییرات در ویژگی سیگنال صورت پذیرفته و علاوه بر آن در مرحله بعد با ایجاد ارتباط میان ویژگی سیگنال در حوزه زمان (دامنه موج) با مشخصه خرابی (قطر سوراخ) اقدام به ایجاد نسبت عددی بین دو کمیت مذکور گردید.

برای تولید امواج لمب در ورق، از یک محرک پیزوالکتریک و برای دریافت امواج منتشر شده در سازه از یک سنسور پیزوالکتریک، هر دو با قطر ۱۰ و ضخامت ۲ میلی متر با فرکانس مرکزی ۲۰۰ کیلوهرتز استفاده گردید که در فاصله ۸ سانتی متری از یکدیگر قرار گرفتند. مبدل های پیزوالکتریک با استفاده از چسب مناسب و با استفاده از یک فویل رسانای مسی بر روی سطح ورق نصب گردید. با استفاده از کابل های نازک مسی و لحیم آن روی سطح مبدل های پیزوالکتریک و لحیم سر دیگر سیم به کانکتورهای مناسب، امکان ارتباط محرک و سنسورها با تجهیزات ارسال پالس تحریک و دریافت سیگنال منتشر شده در سازه فراهم گردید که تصویر شماتیک آن در شکل ۴ قابل مشاهده است.

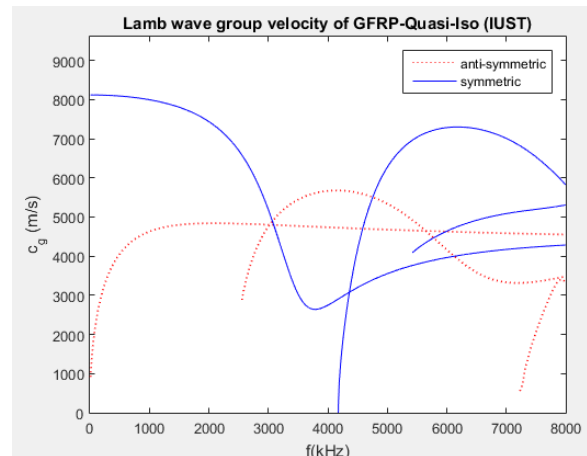
۴. فرآیند انجام آزمایش

با استخراج خواص مکانیکی ورق مطابق با جدول ۱، بر اساس استاندارد ASTM-D 3039/D نمودارهای پراکندگی مربوط به نحوه انتشار امواج لمب در سازه کامپوزیتی، ترسیم گردید.

جدول ۱. خواص مکانیکی ورق کامپوزیتی تحت بررسی

خواص مکانیکی	ورق الیاف شیشه/اپوکسی
چگالی kg/m^3	۱۵۰۰
مدول یانگ GPa	۱۰۰
ضریب پوآسون (ν_{12})	۰/۲۷
ضخامت ورق (mm)	۲

نمودارهای پراکندگی برای ورق کامپوزیتی تحت بررسی، با حل معادله حاصل از رابطه ۲ از روش‌های حل عددی [۹۸] و همچنین با استفاده از برنامه طراحی شده در نرم افزار متلب^{۱۰} حاصل گردید که در شکل ۶ مشاهده می‌شود.



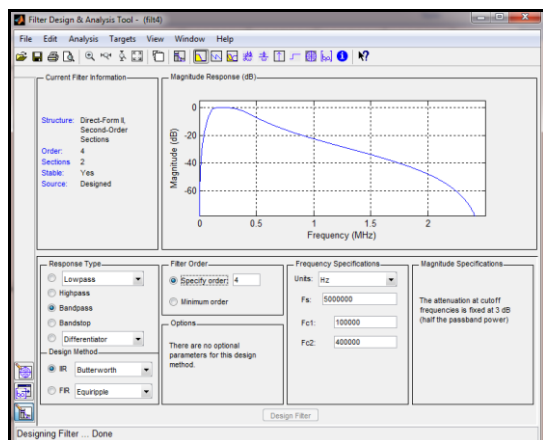
شکل ۶. نمودارهای پراکندگی برای سرعت گروه

با توجه به نمودارهای پراکندگی و از آنجا که مطابق شکل ۶ در محدوده فرکانسی ۲۰۰ کیلوهرتز، تنها دو مود پایه متقارن و نامتقارن تولید شده و سایر مودها در این محدوده فرکانسی تولید نمی‌گردد و نیز با توجه به وجود مبدل‌های پیزوالکتریک با فرکانس مرکزی حدود ۲۰۰ کیلوهرتز در

بازار داخل کشور، برای ایجاد پالس تحریک و تولید امواج لمب در سازه، از تک پالس سینوسی با فرکانس ۲۰۰ کیلوهرتز و دامنه ۲۰ ولت نقطه به نقطه استفاده شد که بیشترین مقدار دامنه را برای امواج خروجی بر روی صفحه اسیلوسکوپ ایجاد می‌نمود. شکل موج سینوسی به دلیل دوره‌ای بودن و رفتار ملایم و همچنین رسیدن به میزان حداکثر دامنه در زمانی کوتاه انتخاب مناسبی برای شکل موج تحریک است. شایان ذکر است که نمی‌توان از یک پالس سینوسی پیوسته برای تحریک استفاده کرد، چرا که تحریک مداوم محرک پیزوالکتریک باعث ارتعاش اجباری ورق تحت بررسی شده و پاسخ دریافتی نیز یک سیگنال سینوسی پیوسته خواهد بود که عملاً برای عیب‌یابی کاربردی نخواهد داشت. چنانچه در آزمایش، امکان افزایش ولتاژ یا همان دامنه پالس تحریک فراهم گردد، نسبت سیگنال به نویز نیز افزایش یافته و سیگنال امواج خروجی نیز دارای شفافیت و وضوح بیشتری خواهند بود. یکی از چالش‌های مهم در این پژوهش عدم دسترسی به آمپلی فایر مناسب در محدوده فرکانسی استفاده شده برای افزایش میزان دامنه پالس تحریک بود. با توجه به عدم وجود آمپلی فایر، به تولید ولتاژ در حدود ۲۰ ولت توسط دستگاه فانکشن ژنراتور انتخاب شده که البته در میان دستگاه‌های موجود، ولتاژ مناسبی بود، بسنده گردید. امواج لمب منتشر شده در ورق کامپوزیتی، توسط سنسور، دریافت شده و توسط اتصالات سیمی به اسیلوسکوپ دیجیتال منتقل شد.

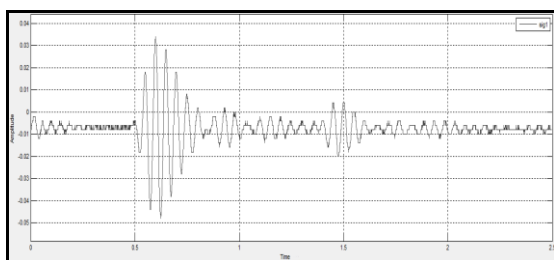
پس از دیجیتال کردن داده‌های آنالوگ توسط اسیلوسکوپ دیجیتال لازم بود داده‌ها برای ذخیره دائمی از حافظه اسیلوسکوپ به حافظه دائمی رایانه انتقال یابند.

ابزار پردازش سیگنال در نرم افزار مذکور امکان طراحی و اعمال انواع ابزارهای پردازش سیگنال از جمله انواع فیلترهای دیجیتال متداول را ارائه می‌کند.

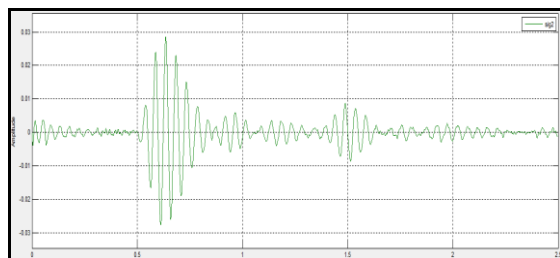


شکل ۸. طراحی فیلتر باترورت برای حذف نویز از سیگنال‌ها

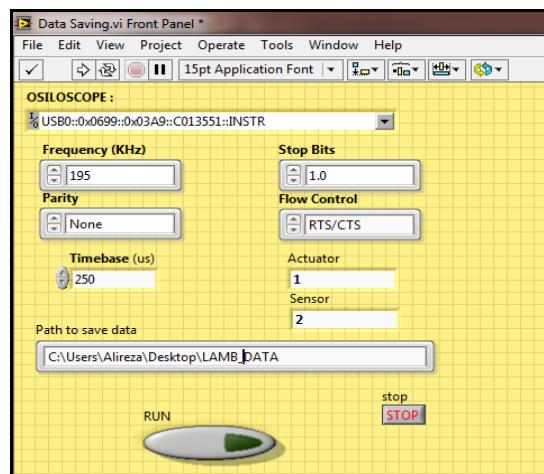
داده‌های ذخیره شده پس از انتقال از فایل مربوطه در محیط کاری نرم افزار متلب از طریق ابزار اس پی تولز^{۱۴} فراخوانی شده و پس از طراحی فیلتر، بر روی سیگنال موردنظر اعمال گردید. داده‌های سیگنال فیلتر شده نیز مجدداً قابل ذخیره سازی و نمایش هستند.



شکل ۹. سیگنال خام و نویزی امواج دریافت شده از سنسور



شکل ۱۰. سیگنال پس از اعمال فیلتر با وضوح و تقارن دامنه بهتر



شکل ۷. استخراج داده ها از اسیلوسکوپ با کد LabView

اسیلوسکوپ دیجیتال از طریق پورت یو. اس. بی.^{۱۱} به رایانه متصل شده تا امکان انتقال اطلاعات از طریق یک نرم افزار واسطه بوجود آید. هر چند بسیاری از اسیلوسکپ-های دیجیتال دارای نرم افزار ذخیره اطلاعات هستند اما در این تحقیق برای ذخیره اطلاعات و در واقع انتقال داده‌ها از اسیلوسکوپ به رایانه نسبت به ایجاد کد نرم افزاری که در محیط لب ویو^{۱۲} آماده شده بود، مطابق شکل ۷ اقدام گردید. داده برداری در هر بار آزمایش ۵ مرتبه تکرار شده و در نهایت به ازای هر آزمایش (یک جفت محرک و سنسور) ۵ فایل، حاوی داده‌ها بدست آمد. داده‌های بدست آمده میانگین‌گیری شده تا ضمن افزایش قطعیت داده‌ها، حتی-الامکان قبل از اعمال فیلترینگ، از میزان نویز محیطی روی سیگنال‌ها نیز کاسته شود.

برای پیش پردازش سیگنال‌ها و حذف نویز از آنها، از فیلتر دیجیتال باترورت^{۱۳} که یکی از فیلترهای مناسب برای این تحقیق و تحقیقات مشابه می‌باشد، استفاده شد. این فیلتر نه تنها فرکانس‌های نامطلوب را حذف می‌کند، بلکه حساسیت یکنواختی نسبت به فرکانس‌های عبوری دارد [۹].

برای اعمال فیلترینگ بر روی سیگنال‌های خام امواج لمب که در رایانه ذخیره شده بودند، از جعبه ابزار قدرتمند پردازش سیگنال در نرم افزار متلب استفاده گردید. جعبه

از آنجا که فرکانس تحریک در حدود ۲۰۰ کیلوهرتز انتخاب شده بود، این فیلتر از نوع میان‌گذر با قابلیت عبور بازه ۱۰۰ تا ۴۰۰ کیلوهرتز از مرتبه ۴ با تواتر نمونه برداری 5E6، طراحی گردید که بهترین نتایج را داشت. همانطور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌گردد، با اعمال این فیلتر بر روی سیگنال امواج دریافتی، مولفه‌های ناخواسته از سیگنال تحت بررسی حذف شده و ضمن ایجاد تقارن مناسبی در نوسان دامنه سیگنال، امکان بررسی بهتر و دقیق‌تر نتایج فراهم گردید. با ذخیره و فیلترینگ داده‌های مربوط به سیگنال امواج لمب که در ورق منتشر شده است، در مراحل بعد با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال، داده‌های جمع‌آوری شده مورد بررسی و تحلیل گرفته و این داده‌ها تبدیل به اطلاعات سودمند و قابل تحلیل شد.

از آنجا که بروز خرابی (سوراخ) در ورق، موجب تغییر خواص مکانیکی و یکپارچگی ورق می‌گردد، الگوی امواج لمب منتشره در سازه دچار تغییر شده و پس از استفاده از روش‌های پردازش سیگنال، با مقایسه اطلاعات مربوط به سیگنال، قبل و بعد از ایجاد خرابی، می‌توان به معیار مناسبی برای تشخیص خرابی در سازه دست یافت.

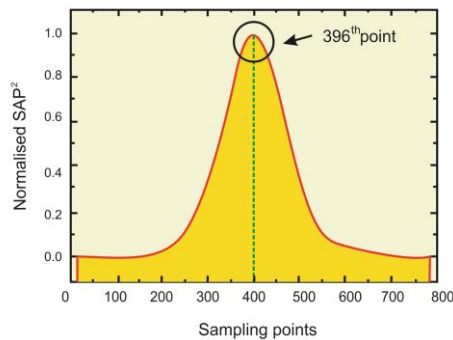
۵. اصول پردازش سیگنال‌های امواج لمب

به دسته‌ای مرتبط از داده‌ها که شامل اطلاعاتی از یک ویژگی یا حالتی از یک سازه یا مجموعه می‌باشد، سیگنال گفته می‌شود. به عبارت دیگر سیگنال شامل علائم و داده‌هایی است که به روش‌های مختلف از سازه تحت بررسی دریافت می‌گردد تا با استفاده از آن داده‌ها، بتوان وضعیت سازه یا مجموعه را بررسی و تعیین نمود. برای دسترسی به داده‌های موجود در یک سیگنال و استخراج اطلاعاتی که سیگنال حاوی آن است، باید آن سیگنال، مورد پردازش قرار گرفته و اصطلاحاً محتوای پنهان آن با روش‌های مناسب و کارآمد، آشکار گردد. به طور کلی هدف از پردازش سیگنال در موارد ذیل خلاصه می‌شود:

- حذف یا کاهش نویزهای محیطی که روی سیگنال اثر گذار بوده و موجب می‌شود اطلاعات سیگنال با ناخالصی و داده‌های بی‌فایده همراه گردد.
- تشکیل سیگنالی شفاف و آماده برای داده‌کاوی
- تحلیل دوگانه یا مجزای اطلاعات زمانی و فرکانسی
- دستیابی به محتوای پنهان (اطلاعات مستتر) سیگنال، ضمن رفع مشکلات و عوامل مزاحم و آشکارسازی خواص مهمی از سیگنال از جمله، دامنه، فرکانس، انرژی، سرعت و زمان انتشار موج به نحوی که بتوان آنها را با استفاده از الگوریتم‌های مناسب به پارامترهای خرابی در سازه مرتبط ساخت.

پردازش سیگنال، در سه حوزه اصلی شامل زمان، فرکانس و حوزه مشترک زمان و فرکانس صورت پذیرفته که هر کدام از حوزه‌های یاد شده دارای مزایای خاص خود هستند. در این تحقیق از روش پردازش سیگنال در حوزه زمان موسوم به تحلیل دامنه موج و روش زمان و فرکانس با نام تبدیل موجک استفاده شده که یکی از کارآمدترین روش‌های پردازش سیگنال محسوب می‌گردد. با توسعه روش‌های تحلیل اطلاعات در حوزه مشترک زمان و فرکانس از اوایل دهه ۵۰ میلادی تبدیل موجک^{۱۵} در صنایع مختلف از جمله پردازش تصاویر، زلزله نگاری، زمین شناسی، علوم پزشکی و مهندسی، توسعه فراوانی یافته است. در دهه ۹۰ میلادی با تلاش‌های دوشی و نیولند، آنالیز موجک کاربرد جدی و وسیعی در پردازش سیگنال‌های ارتعاشی پیدا کرده و موجب شد، پس از آن، آنالیز موجک در حوزه ارزیابی‌های غیرمخرب مورد توجه ویژه قرار گیرد.

به طور خلاصه، موجک شکل موجی است که دارای مدت زمان یا به اصطلاح پنجره محدودی است که میانگین دامنه آن صفر است. در واقع موجک در فارسی ترجمه کلمه



شکل ۱۱. (ب) محاسبه زمان قله یا زمان پرواز بر اساس طیف انرژی

در اکثر تحقیقات، زمان رسیدن موج به قله (حداکثر دامنه) یا TOF^{18} در حوزه زمان یکی از مهمترین ویژگی‌های سیگنال تحت بررسی محسوب می‌گردد، که در واقع اختلاف زمانی میان لحظه ارسال موج توسط محرک و لحظه به حداکثر دامنه موج منتشر شده در سازه، در حوزه زمان است. از طرفی همان‌طور که می‌دانیم، انتشار موج در واقع انتقال انرژی از طریق بسته موج است. لذا می‌توان اختلاف زمانی میان رسیدن موج به حداکثر مقدار انرژی در هنگام انتشار با مقدار انرژی در زمان شروع انتشار موج را به عنوان زمان قله در نظر گرفت.

یکی از روش‌های متداول، محاسبه میزان حداکثر انرژی سیگنال می‌باشد که از طریق نمونه برداری از N نقطه بدست آمده است. با استفاده از مفاهیم و محاسبات آنالیز موجک پیوسته، شاخصی به نام SAP به صورت زیر تعریف می‌گردد:

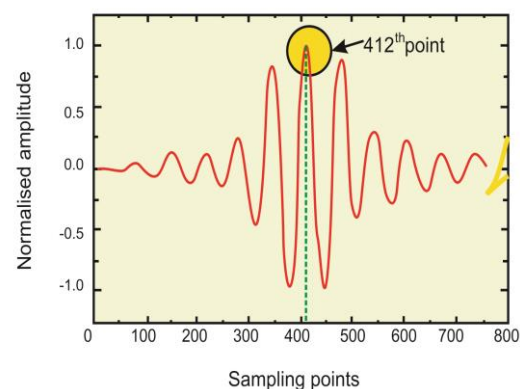
$$SAP^2(n) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |CWT(a_i, n)|^2, i = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

در رابطه فوق، M بزرگترین مقیاس در تبدیل موجک بوده و لذا میانگین انرژی عبوری با نماد E در بازه زمانی مورد نظر و شامل N نقطه داده برداری، از رابطه زیر محاسبه خواهد شد.

ویولت است که کاف تصغیر آن حاکی از همان کوچک بودن موج مورد نظر است. دو نوع آنالیز موجک اصلی کاربرد اساسی در پردازش سیگنال امواج لمب دارند، که عبارتند از آنالیز موجک پیوسته^{۱۶} و آنالیز موجک گسسته^{۱۷} که به طور عمده از نوع اول برای تحلیل داده‌های سیگنال و از نوع دوم برای کاهش نویزهای سیگنال استفاده می‌شود. در این مقاله از نوع اول یعنی موجک پیوسته استفاده شده است. چنانچه یک سیگنال موج لمب مانند $f(t)$ را در نظر بگیریم، با استفاده از تابع متعامد موجک $\psi(t)$ خواهیم داشت:

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

که در آن ψ^* بخش مختلط تابع $\psi(t)$ و $CWT(a, b)$ ضریب تبدیل موجک پیوسته می‌باشد. به عنوان مثال خروجی CWT می‌تواند یک سری فیلتر باند گذر باشد که فرکانس و پهنای باند مرکزی آن به پارامتر مقیاس و تابع موجک مادر وابسته است. در واقع ضرایب موجک، میزان تشابه تابع اصلی سیگنال با تابع موجک مادر در آن مقیاس و زمان است. از این ضرایب می‌توان برای تعیین توزیع انرژی مربوط به سیگنال مذکور در حوزه مشترک زمان و فرکانس استفاده کرد [۱۰].



شکل ۱۱. (الف) محاسبه زمان قله یا زمان پرواز بر اساس دامنه

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SAP^2(n), n = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

مطابق شکل ۱۱ در یک آزمایش با استفاده از آنالیز موجک، بر اساس روش مشروح فوق، موج در نقطه ۳۹۶ به حداکثر میزان انرژی خود رسیده در حالیکه در حوزه زمان حداکثر دامنه موج در نقطه ۴۱۲ به حداکثر مقدار رسیده است. لذا بر اساس محاسبات و توضیحات فوق الذکر، اختلاف میزان محاسبه زمان قله از دو روش مذکور، کمتر از ۰.۵٪ بوده که نشان می‌دهد هر دو روش از مقبولیت مناسبی برخوردار بوده و می‌تواند به جای هم مورد استفاده قرار گیرند [۱۱].

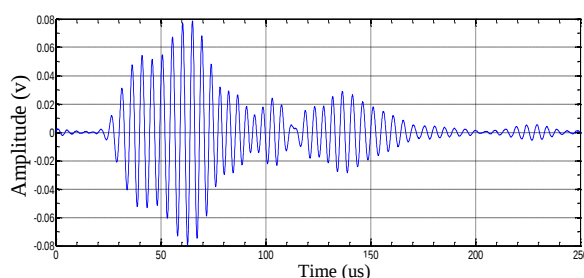
مهمترین چالش در خصوص شناسایی عیوب سازه‌ای بر اساس روش‌های مبتنی بر تحلیل سیگنال، بررسی این موضوع است که سیگنال بعد از وقوع خرابی چه تغییراتی نسبت به سیگنال مربوط به سازه سالم داشته است؟

بررسی چگونگی این تغییرات با استفاده از الگوریتم‌ها و روش‌هایی است که به استناد ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال‌های سازه، میان حالت سالم و معیوب تمایز ایجاد کرده و سپس میزان تغییرات ایجاد شده در سیگنال‌ها (میزان تمایز آنها) را با مشخصات خرابی کالیبره می‌نمایند. بنابراین، استخراج ویژگی‌های سیگنال مرحله کلیدی و بسیار مهمی از فرآیند شناسایی خرابی توسط امواج لمب محسوب می‌گردد تا آنجا که برخی محققین، موفقیت در شناسایی خرابی را مترادف با توفیق در استخراج ویژگی می‌دانند.

۶. استخراج داده‌ها و نتایج

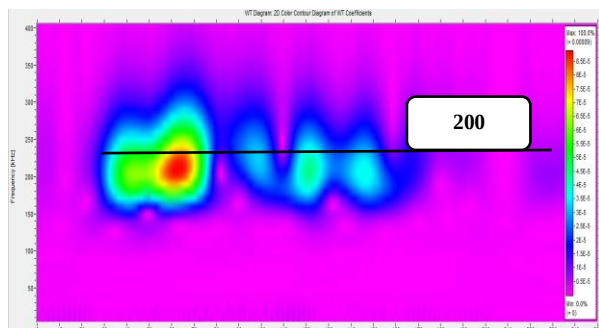
مطابق شکل ۱۲ می‌توان چند دسته موج یا به اصطلاح چند مؤلفه اصلی را در سیگنال دریافت شده از سازه به وضوح مشاهده نمود. با توجه به مشخص بودن فاصله محرک از سنسور (۸۰ میلی‌متر) و سرعت گروه موج، مطابق نمودار پراکندگی، مود نامتقارن پایه باید در زمان ۲۰

میکروثانیه فاصله محرک تا سنسور را طی کند، که بر اساس داده‌های حاصل از آزمایش، زمان رسیدن اولین جبهه موج^{۱۹} به سنسور ۲۱/۴ میکروثانیه می‌باشد، که تطابق بسیار مناسبی است. اختلاف مذکور در زمان رسیدن موج، می‌تواند ناشی از خطای استخراج خواص مکانیکی ورق یا شرایط محیطی انجام آزمایش باشد که البته هیچگونه تاثیری در نتایج ندارد. با توجه به نمودار پراکندگی و توضیحات فوق، می‌توان چنین استنباط نمود که مؤلفه اول مربوط به مود پایه نامتقارن بوده و مؤلفه دوم، با ماهیت بازتابی، حاصل از عبور مجدد موج از سنسور پس از برخورد با مرزهای آزاد ورق است. مؤلفه‌های بعدی نیز، سایر بازتاب‌های موج از مرزهای آزاد ورق تحت بررسی است.

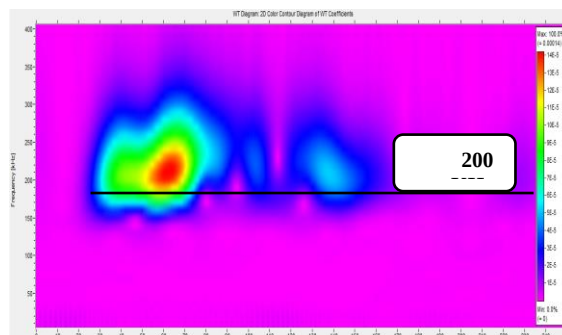


شکل ۱۲. سیگنال امواج لمب در ورق سالم

با توجه به شکل فوق مشاهده می‌گردد که سیگنال دریافتی از سنسور در ورق سالم (بدون وجود سوراخ) دارای مؤلفه‌های مختلفی است که به نظر می‌رسد مؤلفه‌های متعدد موج منتشره، دارای همپوشانی و تداخل نیز باشند. به‌طوریکه به دلیل تداخل مؤلفه اول و دوم زمان رسیدن مؤلفه دوم به سنسور به‌طور واضح قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد که دلیل آن نزدیکی محرک و سنسور و کوچک بودن ابعاد نمونه است. برای تشخیص و تمایز این مؤلفه‌ها با استفاده از تبدیل موجک پیوسته تحت تابع گابور^{۲۰} به عنوان موجک مادر، اقدام به پردازش سیگنال گردید که نتایج آن مطابق با شکل ۱۳ می‌باشد.

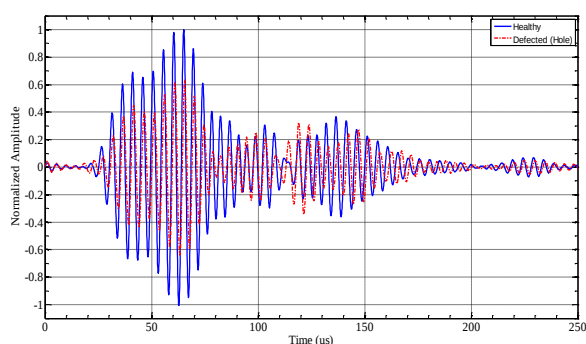


شکل ۱۵. تبدیل موجک سیگنال امواج لمب در ورق معیوب



شکل ۱۳. تبدیل موجک سیگنال امواج لمب در ورق سالم

باردیگر با انجام تبدیل موجک، این بار بر روی سیگنال مربوط به سازه معیوب، مؤلفه‌های امواج منتشره در سازه مطابق شکل ۱۵ قابل مشاهده است. در این تصویر، افزایش تعداد مؤلفه‌ها را می‌توان به رخداد پدیده تبدیل موجک مرتبط دانست.

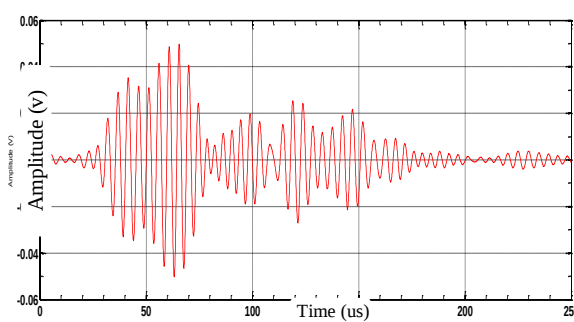


شکل ۱۶. مقایسه سیگنال امواج لمب در ورق الیاف

شیشه/پوکسی در حالت سالم و معیوب در حوزه زمان

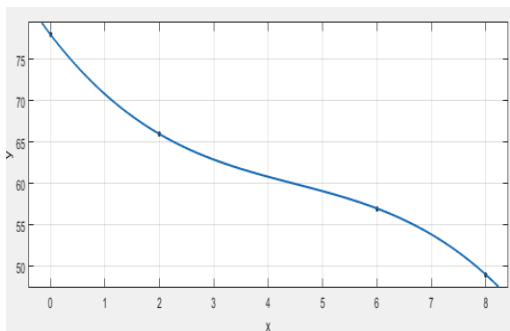
همان‌طور که در شکل مقایسه‌ای ۱۶ ملاحظه می‌گردد، حضور خرابی (سوراخ) موجب افت دامنه به صورت کاملاً مشهود برای هر دو مؤلفه اول و دوم موج شده است. کاهش بیشینه ضرایب موجک (در حالت سالم و معیوب با وجود سوراخ به قطر ۸ میلی‌متر) که با مقایسه شکل‌های ۱۳ و ۱۵ مشهود است، می‌تواند به عنوان معیار مناسب دیگری برای تشخیص وجود خرابی به دلیل کاهش انرژی موج (هر دو مؤلفه عبوری و بازتابی)، هنگام عبور از خرابی محسوب گردد. با انجام محاسبات و استخراج ضرایب

با استفاده از تبدیل موجک، کاملاً واضح است که فرکانس غالب سیگنال، در محدوده ۲۰۰ کیلوهرتز قرار داشته که همان بازه فرکانس مرکزی پالس تحریک است. توسط آنالیز موجک امکان تشخیص و تمایز چهار مؤلفه مختلف از موج با وضوح کاملاً مناسب، به وجود آمد، که بر اساس شکل ۱۳ مؤلفه دوم موج دارای بیشترین تمرکز میزان انرژی (متناسب با ضریب موجک) در زمان ۶۵ میکروثانیه است.



شکل ۱۴. سیگنال در ورق الیاف شیشه/پوکسی با وجود سوراخ

پس از ایجاد سوراخ در ورق کامپوزیتی تحت بررسی، با انجام مجدد آزمایش، سیگنال امواج لمب با استفاده از سنسور دریافت شد که شکل موج آن، برای سوراخ با بیشترین قطر (۸ میلی‌متر) مطابق شکل ۱۴ می‌باشد.



شکل ۱۸. برازش منحنی جهت تخمین شدت خرابی (قطر سوراخ)

۷. جمع بندی

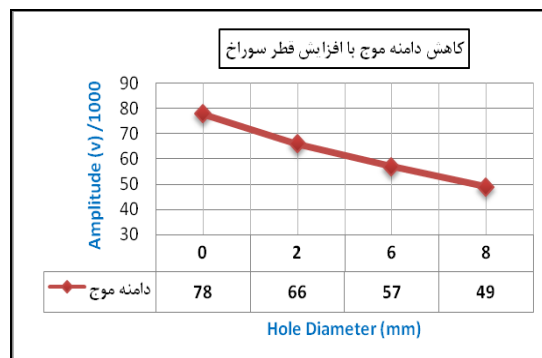
نتایج کلی حاصل از این پژوهش را می توان در موارد ذیل خلاصه نمود:

- با توجه به ایجاد شدن مؤلفه‌های مختلف موج لمب در ورق، شامل مؤلفه‌های اصلی و مؤلفه‌های بازتابش شده از خرابی یا لبه‌های ورق و همچنین امکان همپوشانی مؤلفه‌ها و دشوارتر شدن تحلیل نتایج (به عنوان مثال همپوشانی و تداخل مؤلفه اول و دوم موج منتشر شده در ورق)، استفاده از آنالیز موجک برای شناسایی و تمایز مؤلفه‌های مختلف امواج لمب راه حلی کاربردی است.

- در مقایسه حالت سالم و معیوب سازه، بر اساس آنالیز موجک، می‌توان مشاهده نمود در حالت معیوب، تعداد مؤلفه‌های موج افزایش می‌یابد که می‌تواند به دلیل پدیده تبدیل مود و انعکاس امواج، ضمن برخورد با خرابی و همچنین پیچیدگی رفتار انتشار امواج لمب در ورق کامپوزیتی به دلیل پیدایش خرابی در ورق کامپوزیتی باشد.

- در مقایسه بین دو حالت سالم و معیوب سازه، کاهش میزان حدود ۳۷٪ از بیشینه مقدار ضرایب موجک، که بر اساس تحلیل (در حوزه تلفیقی زمان و فرکانس) حاصل شده است، تطابق بسیار خوبی با میزان کاهش بیشینه مقدار دامنه

موجک مربوط به سیگنال، در حالت سالم و معیوب مشخص گردید بیشینه ضرایب موجک (در حوزه مشترک زمان و فرکانس) در حالت معیوب ۳۷/۳٪ کمتر از حالت سالم است. این درحالی است که میزان کاهش بیشینه مقدار دامنه (در حوزه زمان) عدد ۳۶/۵٪ را نشان می‌دهد که نتایج حاصل از هر دو حوزه زمان و حوزه مشترک زمان و فرکانس، نزدیکی مناسبی دارند. در گام بعدی مطابق شکل ۱۷ با کالیبره کردن میزان افت دامنه سیگنال با اندازه قطر سوراخ، امکان طراحی شاخص خرابی مناسب برای تخمین اندازه سوراخ در ورق کامپوزیتی به وجود آمد. هر چند رفتار موج در مواجهه با افزایش قطر سوراخ روندی کاهشی در دامنه آن را به خوبی نمایش می‌دهد، لیکن در صورت افزایش تعداد نمونه‌ها امکان تحلیل دقیق‌تر رفتار کاهشی دامنه موج، به ازای تغییر قطر سوراخ در ورق فراهم خواهد شد.



شکل ۱۷. نمودار کاهش دامنه امواج با افزایش قطر سوراخ

در مراحل تکمیلی با استفاده از روش‌های تقریب ریاضی نظیر برازش منحنی، شبیه به آنچه در شکل ۱۸ (کمیت روی محورها همانند شکل ۱۷ هستند) ملاحظه می‌گردد، می‌توان نسبت به تخمین شدت (اندازه) خرابی در حالات نامشخص بر اساس مشخصات (دامنه) دریافت شده از موج منتشره در سازه به کمک یک منحنی درجه سه اقدام نمود.

سیگنال (در حوزه زمان) دارد که نشان از کاهش سطح انرژی موج پس از عبور از خرابی دارد.

- پیرو بحث نظری مطرح شده در شکل ۱۱، تطابق زمانی قابل قبول بین آنالیز امواج در حوزه زمان و حوزه مشترک زمان و فرکانس در خصوص زمان رخداد بیشترین مقدار دامنه مؤلفه‌های مختلف موج، وجود دارد.

- شکل موج، محدوده فرکانسی و فاز سیگنال، در هر دو حالت سالم و معیوب بودن سازه، با وجود برخی تفاوت‌ها، تطابق بسیار مناسبی با یکدیگر دارند. این تطابق به خصوص در مورد مؤلفه‌های اول و دوم موج بیشتر بوده که می‌تواند به نوعی موید دقت آزمایش در هر دو حالت تلقی گردد.

- در مقایسه سیگنال حالت سالم و معیوب، مطابق شکل ۱۶ هر چند مقدار اندکی تاخیر زمانی میان زمان قله مؤلفه‌های اول و دوم موج در حالت معیوب بودن سازه در مقایسه با حالت سالم وجود دارد، لیکن با توجه به نزدیکی فاصله بین محرک و سنسور، این مقدار تاخیر زمانی ناچیز بوده و از آن برای بررسی و تعیین معیار شناسایی خرابی استفاده نگردید.

- برای طراحی شاخص خرابی در حوزه زمان، به منظور ایجاد ارتباط میان ویژگی‌های موج (دامنه) با مشخصات خرابی (قطر سوراخ)، مطابق شکل ۱۷ نمودار ارتباط دامنه موج با ابعاد (قطر) سوراخ ترسیم شده که به خوبی بیانگر کاهش

اندازه دامنه موج با افزایش یافتن قطر سوراخ است.

- با استفاده از روش‌های تقریب ریاضی، نظیر برازش منحنی، مطابق شکل ۱۸ ضمن ایجاد ارتباط میان دو پارامتر دامنه موج و قطر سوراخ، می‌توان به تقریب قطر سوراخ بر اساس میزان کاهش دامنه در حالات نامشخص مبادرت نمود.

از این منحنی درجه سوم می‌توان برای تخمین شدت خرابی (سوراخ) در ورق کامپوزیتی تحت بررسی با دقت مناسب استفاده نمود. با این حال با توجه به پیچیدگی موضوع، افزایش موارد داده برداری در تحقیقات بعدی می‌تواند به دقت نتایج و تحلیل‌ها بیفزاید. با افزودن ویژگی‌های دیگری از سیگنال نظیر تاخیر زمانی یا ترکیب ویژگی‌ها از دو حوزه مختلف زمان و حوزه زمان و فرکانس، می‌توان به طراحی شاخص‌های پیچیده‌تر و البته دقیق‌تر مبادرت نمود که موضوع مناسبی برای تحقیقات آتی در این حوزه می‌باشد.

قدردانی

از مساعدت جناب آقای دکتر رضادوست عضو هیات علمی پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران و آقای مهندس فحول برای همکاری مسئولانه در ساخت نمونه‌های کامپوزیتی تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. مأخذ

[1] Kaw, A. K., "Mechanics of composite Materials", Taylor & Francis group, 2006.

[2] Bing Li, Lin Ye, Zheng Li, Zhaoyang Ma, Hamed Kalhori, "Quantitative identification of delamination at different interfaces using guided wave signals in composite laminates", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol.34, No.18, 2015, pp.1506-1525.

- [3] Brigman, N., "Structural health monitoring in commercial aviation", *Idaho state university*, 2009.
- [4] Giurgiutiu, V. "Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors", Elsevier Inc, 2008.
- [5] Speckmann, H., H. Roesner, "Structural Health Monitoring: A Contribution to the Intelligent Aircraft Structure", *ECNDT - Tu.1.1.1*, 2006.
- [6] Balageas, D., Claus-Peter Fritzen, Alfredo Güemes, "Structural Health Monitoring", Wiley-ISTE, 2006.
- [7] Rose, Joseph L., "Ultrasonic guided waves in solid media", Pennsylvania State University, 2014.
- [8] Giurgiutiu, V., Cuc, A. "Embedded non-destructive evaluation for structural health monitoring, damage detection, and failure prevention", *The Shock and Vibration Digest*, Vol.37, No.2, 2005, pp. 83–105.
- [9] Karis, S. T., "Signal and Systems with matlab computing and Simulink Modeling", 3rd Edition, Orchard Publication, 2007.
- [10] Misiti, Michel, Yves Misiti, "Wavelet toolboxTM user's Guide: Matlab", Mathworks, 2010.
- [11] Su, Z., X. Wang, Z. Chen, L. Ye, "A hierarchical data fusion scheme for identifying multi-damage in composite structures with a built-in sensor network", *Smart Materials and Structures*, Vol.16, No.6, 2007.

پی‌نوشت

-
1. Non-Destructive Evaluation
 2. Anisotropic
 3. Structural Health Monitoring
 4. Piezoelectric Transducer
 5. Lamb Waves
 6. Dispersion Curves
 7. Glass Fiber Reinforced Epoxy (GFRE)
 8. Quasi-Isotropic
 9. Vacuum Infusion Process
 10. Matlab
 11. USB
 12. LabView
 13. Butterworth
 14. SPTOOL
 15. Wavelet
 16. Continuous Wavelet Transform
 17. Discontinuous wavelet Transform
 18. Time Of Flight
 19. Time Of Arrival
 20. Gabor Wavelet Function
 21. Mode Conversion