

استفاده از تبدیل موجک در فرایند پایش سلامت سازه‌های ورقی کامپوزیتی با استفاده از امواج فراصوت هدایت‌شده

محمد ریاحی^۱، علیرضا احمدی^۲

۱ استاد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، riahi@iust.ac.ir

۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۷

چکیده

طراحی و ایجاد یک سامانه پایش سلامت سازه‌های مبتنی بر امواج فراصوت هدایت‌شده، با استفاده از مبدل‌های پیزوالکتریک با نقش دوگانه محرک و حسگر، به‌منظور شناسایی خرابی در ورق کامپوزیتی از جنس پلیمر تقویت‌شده با الیاف کربن در این پژوهش، تشریح و ارائه گردیده و همچنین نتایج حاصل از آن با هدف تعمیم و توسعه این روش برای شناسایی خرابی در موقعیت‌های مشابه دیگر، تحلیل و ارائه شده است. بررسی رخداد تغییرات در ویژگی‌های سیگنال امواج فراصوت هدایت‌شده به‌دلیل پیدایش خرابی، در هنگام انتشار این امواج در سازه، می‌تواند به شناسایی و تعیین مشخصات خرابی و عیوب سازه‌ای منجر شود. به‌کارگیری مفاهیم و روش‌های پیشرفته پردازش سیگنال در حوزه زمان و همچنین حوزه تلفیقی زمان و فرکانس، نظیر تبدیل موجک با هدف استخراج و مقایسه ویژگی‌های سیگنال امواج منتشر شده در سازه در دو حالت سالم و معیوب، همراه با طراحی شاخص خرابی متناسب با تغییرات سیگنال امواج، برای تعیین شدت نسبی خرابی در ورق تحت بررسی، از ویژگی‌های پژوهش حاضر محسوب می‌شود.

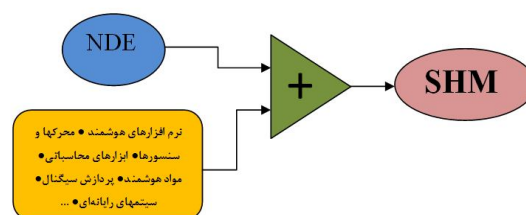
واژگان کلیدی: پایش سلامت سازه‌ای، آزمون‌های غیرمخرب، امواج فراصوت هدایت‌شده، ورق کامپوزیتی، تبدیل موجک

۱. مقدمه

باشد [۱]. با وجود کاربرد فراوان و روبه 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. هرچند سازه‌های کامپوزیتی مزایای فراوانی دارند، اما به‌هنگام رخداد خرابی، تقریباً بدون نشانه و هشدار خاصی، به شکل فاجعه‌آمیزی دچار شکست می‌شوند. استفاده از ورق‌های کامپوزیتی چندلایه به‌عنوان اجزای

کامپوزیت‌ها دارای مزایای فراوانی از قبیل بهبود استحکام، سفتی، خستگی، مقاومت به ضربه، رسانایی گرمایی و مقاومت در برابر خوردگی هستند. مدول ویژه و استحکام ویژه در کامپوزیت‌ها بسیار بالاست. برای مثال استحکام کامپوزیت تک‌جهته گرافیت / اپوکسی می‌تواند مشابه فولاد باشد، اما استحکام ویژه آن سه برابر فولاد است که این موضوع می‌تواند به‌معنای کاهش وزن سازه کامپوزیتی در عین حفظ استحکام آن

اصلی در ساخت سازه‌های نوین، نظیر بدنه هواپیماهای پهن پیکر کاربرد فراوانی یافته است. با اینحال، آسیب‌پذیری آنها در برابر عوامل محیطی نظیر ضربه یا برخورد اشیای مختلف که منجر به ایجاد عیوبی نظیر شکاف، سوراخ یا جدایش بین لایه‌ای می‌گردد، همچنان موضوعی چالش‌برانگیز است [۲]. شناسایی صحیح و به‌موقع انواع خرابی در سازه‌های کامپوزیتی می‌تواند نقش بسزایی در جلوگیری از رخداد حوادث و فجایع به‌خصوص در صنایع حساس و مهم نظیر صنعت هوافضا داشته باشد. نظر به محدودیت‌های موجود در اجرای روش‌های معمول ارزیابی غیرمخرب^۱، از قبیل عدم کارایی مناسب در شناسایی برخی عیوب به‌خصوص در مواد کامپوزیتی به‌دلیل ساختار پیچیده این مواد، نیاز به روش‌های نوین بیش از پیش احساس می‌شود [۳]. به‌عنوان مثال با توجه به نیاز به امکان دسترسی مستقیم به ناحیه تحت بازرسی در روش‌های ارزیابی غیرمخرب، انجام بازرسی‌های مداوم و مستمر، مبتنی بر آزمون‌های غیرمخرب متداول از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه نخواهد بود [۴]. پایش سلامت سازه‌ای^۲ جایگزینی جدید برای روش‌های معمول ارزیابی غیرمخرب است که سبب اطمینان از عدم وجود عیوب در سازه می‌شود. اصول و مبانی پایش سلامت سازه‌ای بر پایه ارزیابی‌های غیرمخرب بنا شده است [۵]. مطابق مفهوم ارائه‌شده در شکل ۱، بسیاری از روش‌های مبتنی بر پایش سلامت سازه‌ای با تبدیل روش‌های ارزیابی غیرمخرب با استفاده از ابزارهای نوین نظیر محرک‌ها، حسگرها، نرم‌افزارهای هوشمند و انواع پردازش‌های رایانه‌ای، با استفاده از پردازنده‌های قدرتمند، قابل تبدیل به روش‌های پایش سلامت سازه‌ای می‌باشند [۶].



شکل ۱. ارتباط معنایی ارزیابی غیرمخرب با پایش سلامت سازه‌ای

پایش سلامت سازه‌ای را می‌توان نوعی فناوری دانست که به‌صورت مستمر، خودکار و در حالی که نیاز به خارج کردن سازه از حالت عملیاتی نباشد، اقدام به پایش وضعیت سازه می‌نماید. این امر با نصب یا الصاق دائمی حسگرهایی با حداقل مداخله

انسانی صورت می‌گیرد و عواملی نظیر انواع خرابی، خستگی، خوردگی، آسیب‌های ناشی از ضربه، بارهای اضافی و حالات گوناگون پیش‌بینی نشده را تحت پایش قرار می‌دهد. از خصوصیات مهم یک سامانه پایش سلامت سازه‌ای می‌توان به این موارد اشاره نمود [۶]:

۱. امکان نصب حسگرها به‌صورت دائمی در بدنه سازه
۲. عدم نیاز به دسترسی فیزیکی مستقیم به سازه
۳. ایمنی بالا در بازرسی نواحی حساس و خطرناک از سازه
۴. عدم نیاز به ابزارهای پیمایش نقطه‌ای یا خطی
۵. بازرسی خودکار و مکانیزه
۶. امکان بررسی چندین نقطه از سازه به‌صورت همزمان
۷. کاهش تأثیر تفاسیر و خطاهای انسانی در فرایند بازرسی از میان روش‌های مختلف طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های مبتنی بر پایش سلامت سازه‌ای، استفاده از امواج فراصوت هدایت‌شده در سال‌های اخیر به‌خصوص در پایش سلامت سازه‌های ورقی کامپوزیتی، رشد چشمگیری داشته است. امروزه امواج فراصوت هدایت‌شده، که در سازه‌های ورقی با نام امواج لمب شناخته می‌شوند، به‌دلیل مزایای فراوان از جمله توانایی پیمایش در فواصل طولانی، امکان حرکت در مسیرهای غیرمستقیم و حساسیت مناسب به انواع خرابی، به ابزاری مناسب برای ایجاد سامانه‌های پایش سلامت سازه‌ای تبدیل شده که برتری‌های آن نسبت به آزمون‌های غیرمخرب متداول از جمله آزمون غیرمخرب معمول با امواج فراصوت به اثبات رسیده است [۷].

در این رهیافت با وجود روش‌های مختلف ارسال و دریافت امواج مذکور، استفاده از میدل‌های پیزوالکتریک^۳ به‌دلیل وزن سبک و قیمت مقرون به‌صرفه در کنار سهولت استفاده، راهکاری مناسب و روبه توسعه است. در این روش سیگنال امواج فراصوت هدایت‌شده که در سازه منتشر شده است، در هر دو حالت سالم و معیوب از سازه دریافت گردیده و مقایسه این دو سیگنال با یکدیگر می‌تواند معیار مناسبی برای وجود یا عدم وجود خرابی در سازه باشد [۸-۹].

۲. اصول و تئوری امواج فراصوت هدایت‌شده

امواج لمب^۴ به‌عنوان امواج فراصوت هدایت‌شده در سازه‌های ورقی محسوب می‌شوند و قادر به حرکت در سازه‌های نازک، با

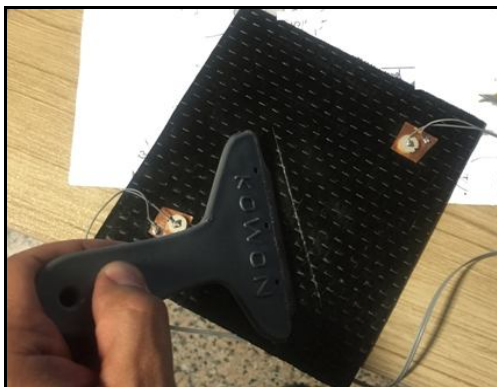
پارامترهای طراحی آزمایش محسوب می‌گردد، استفاده خواهد شد. گفتنی است با انجام تغییراتی در این معادلات می‌توان آن را به ورق‌های چندلایه نیز تعمیم داد [۱۰].

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 qp}{(k^2 - q^2)^2} \quad \text{برای مدهای متقارن}$$

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(k^2 - q^2)^2}{4k^2 qp} \quad \text{برای مدهای نامتقارن} \quad (2)$$

۳. طراحی و پیکربندی آزمایش

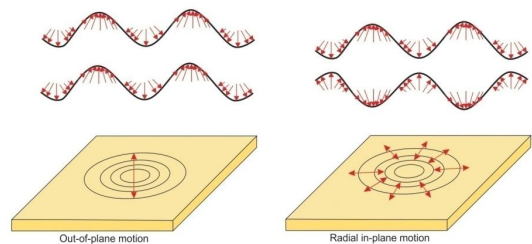
هدف از این پژوهش، طراحی و ساخت سامانه پایش سلامت سازه‌ای در ورق کامپوزیتی از جنس پلیمر تقویت‌شده با الیاف کربن^۶ است که به دلیل وجود یک خرابی (شکاف) در آن دچار آسیب بود. الیاف مورد نیاز برای ساخت نمونه‌ها از جنس الیاف کربن تک‌جهته تولید شرکت ای. ام. پی.^۷ بوده و رزین استفاده‌شده از نوع اپوکسی بیسفنول که با نسبت حدود ۱۲ درصد با ماده سفت‌کننده ترکیب گردید. لایه‌چینی ورق به صورت $[0/-45/45/90]_s$ در هشت لایه و در نتیجه شبه‌همسانگرد^۸ انتخاب شد که منجر به تولید ورقی با ضخامت نهایی حدود ۲ میلی‌متر گردید. چهار نمونه از ورق در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران به روش تزریق درخلاق^۹ ساخته شد که نهایتاً یکی از ورق‌ها با کیفیت ساخت بهتر با ابعاد 150×150 میلی‌متر برای انجام آزمایش انتخاب گردید.



شکل ۴. ایجاد شکاف در نمونه برای انجام آزمایش

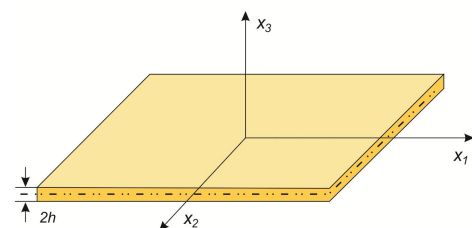
برای ایجاد خرابی در نمونه به صورت مصنوعی، یک شکاف با پهنا و عمق به ترتیب حدود ۱ و ۰/۱ میلی‌متر با زاویه ۴۵ درجه نسبت به لبه افقی ورق با استفاده از لبه تیز کاردک ایجاد گردید که در مراحل بعدی عمق شکاف به ۰/۵ و ۱ میلی‌متر افزایش پیدا کرده و نتایج در شرایط مختلف بررسی گردید. برای تولید

دو سطح آزاد موازی هستند. این امواج در امتداد مرز سازه حرکت می‌کنند و در واقع مرز سازه حرکت این امواج را هدایت می‌کنند که به همین دلیل به این امواج، هدایت‌شده می‌گویند. امواج لمب، به واقع اغتشاشات الاستیک در یک ورق جامد، با شرایط آزاد مرزی است که برحسب مدهای 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 است.



شکل ۲. مدهای متقارن (راست) و نامتقارن (چپ) امواج لمب

به عنوان مثال دو مود بسیار پرکاربرد که اصطلاحاً مدهای مرتبه صفر یا مدهای پایه شناخته می‌شوند با نمادهای A_0 و S_0 تعریف می‌شوند. در یک ورق نازک همگن و همسانگرد، شبیه آنچه در شکل ۳ نمایش داده شده است، امواج لمب، صرف‌نظر از مود مربوطه، در قالب تانسوری در مختصات کارتزین به صورت زیر قابل توصیف هستند:



شکل ۳. انتشار امواج لمب در ورق نازک با ضخامت 2h

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

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

به طوری که در معادله ۱، 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، می‌توان معادله ۱ را به دو بخش مجزا مربوط به مدهای متقارن و نامتقارن تجزیه کرد. از این معادلات برای ترسیم نمودارهای پراکندگی^۵، که در واقع گام اول تعیین

کنترل از طریق رایانه استفاده شد. اسیلوسکوپ مذکور دارای دو کانال ورودی برای مشاهده همزمان سیگنال پالس تحریک و سیگنال امواج لمب دریافتی از سازه می‌باشد.

۴. انجام آزمایش

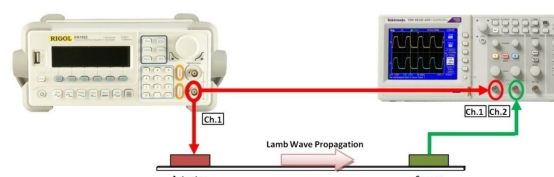
با استخراج خواص مکانیکی ورق براساس استاندارد مربوطه [۱۱] مطابق با جدول ۱، نمودارهای پراکندگی مربوط به نحوه انتشار امواج لمب در سازه کامپوزیتی ترسیم گردید.

جدول ۱. خواص مکانیکی ورق کامپوزیتی تحت بررسی

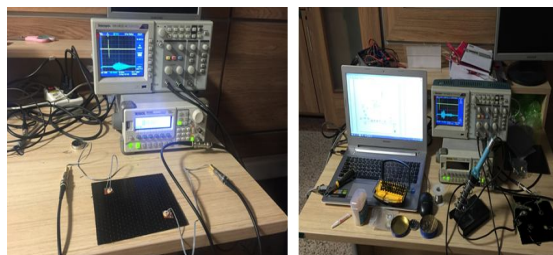
خواص مکانیکی	ورق الیاف کربن / اپوکسی
چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	۱۶۰۰
مدول یانگ (گیگاپاسکال)	۷۰
ضریب پواسون	۰/۳
ضخامت ورق (میلی‌متر)	۲

نمودارهای پراکندگی و سرعت مدهای مختلف موج برای ورق تحت بررسی، با حل معادله حاصل از رابطه ۲ از روش‌های حل عددی و با استفاده از برنامه نوشته شده در محیط نرم‌افزار متلب^۱ مطابق شکل ۷ می‌باشد [۱۲-۱۳]. با توجه به نمودارهای نمودارهای پراکندگی، چون مطابق شکل ۷ 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 داخلی، برای ایجاد پالس تحریک و تولید امواج لمب در سازه، از تک‌پالس سینوسی با فرکانس ۱۹۵ کیلوهرتز و دامنه ۲۰ ولت نقطه به نقطه استفاده شد که بیشترین مقدار دامنه را برای امواج خروجی 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. گفتنی است نمی‌توان از یک پالس سینوسی پیوسته برای تحریک استفاده کرد؛ زیرا تحریک مداوم محرک پیزوالکتریک سبب 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 نوفه نیز

امواج لمب در ورق، از یک محرک پیزوالکتریک و برای دریافت امواج منتشرشده در سازه از یک حسگر پیزوالکتریک، هر دو با قطر ۱۰ و ضخامت ۲ میلی‌متر با فرکانس مرکزی ۲۰۰ کیلوهرتز استفاده گردید. مبدل‌های پیزوالکتریک با استفاده از چسب مناسب و با استفاده از یک فویل رسانای مسی روی سطح ورق نصب گردید. با استفاده از کابل‌های نازک مسی و لحیم آن روی سطح مبدل‌های پیزوالکتریک و لحیم سر دیگر سیم به کانکتورهای BNC امکان ارتباط محرک و حسگرها با تجهیزات ارسال پالس تحریک و دریافت سیگنال منتشر شده در سازه فراهم گردید که تصویر شماتیک آن در شکل ۵ قابل مشاهده است.



شکل ۵. تصویر شماتیک پیکربندی آزمایش

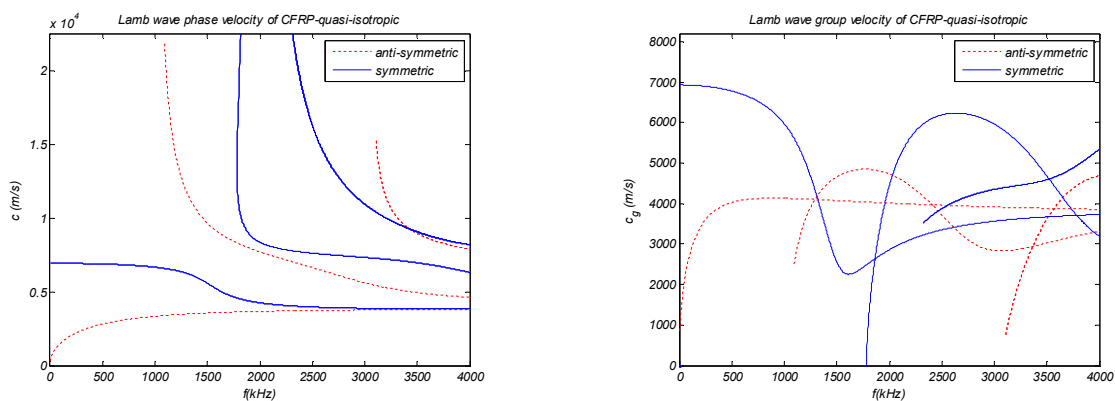


شکل ۶. پیکربندی آزمایش و اتصال نمونه به تجهیزات آزمایشگاهی

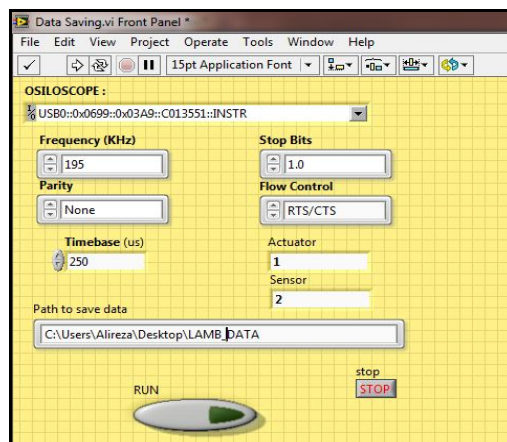
مطابق شکل ۶ جهت ایجاد پالس تحریک از یک دستگاه فانکشن ژنراتور از نوع RIGOL DG 1022 استفاده شد. ایجاد چند نوع شکل موج متنوع و حتی ایجاد شکل موج دلخواه با محدوده فرکانسی یک میکروهرتز تا ۲۰ مگاهرتز، ایجاد دامنه تحریک حداکثر ۲۰ ولت نقطه به نقطه، امکان اتصال حافظه فلش، دو کانال خروجی مجزا، امکان اتصال به آمپلی‌فایر و نیز وجود کلید برست در پنل آن از مزایای این دستگاه می‌باشد. برای مشاهده، دیجیتالی کردن و ذخیره‌سازی سیگنال‌های مربوط به امواج لمب که توسط حسگرها از ورق کامپوزیتی دریافت می‌شوند، از یک دستگاه اسیلوسکوپ دیجیتالی از نوع Tektronix TDS 1012C-SC با پهنای باند ۴۰ مگاهرتز، نرخ نمونه‌برداری یک گیگا سمپل بر ثانیه، دارای دو کانال، قابلیت برنامه‌ریزی و

افزایش یافته و سیگنال امواج خروجی نیز دارای شفافیت و وضوح بیشتری خواهند بود. یکی از چالش‌های مهم در این پژوهش عدم دسترسی به آمپلی‌فایر مناسب در محدوده فرکانسی استفاده‌شده برای افزایش میزان دامنه پالس تحریک بود. با توجه به نبود آمپلی‌فایر، 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 منتشرشده در ورق کامپوزیتی، توسط حسگر دریافت و توسط اتصالات سیمی به اسیلوسکوپ دیجیتال منتقل شد. پس از

دیجیتال‌کردن داده‌های آنالوگ توسط اسیلوسکوپ دیجیتال لازم بود داده‌ها برای ذخیره دائمی از حافظه اسیلوسکوپ به حافظه دائمی رایانه انتقال یابند. اسیلوسکوپ دیجیتال از طریق پورت USB به رایانه متصل شد تا انتقال اطلاعات از طریق یک نرم‌افزار واسط ممکن شود. هرچند بسیاری از اسیلوسکوپ‌های دیجیتال دارای نرم‌افزار ذخیره اطلاعات هستند، اما در این پژوهش برای ذخیره اطلاعات و در واقع انتقال داده‌ها از اسیلوسکوپ به رایانه نسبت به ایجاد کد نرم‌افزاری که در محیط LabView آماده شده بود، مطابق شکل ۸ اقدام شد.



شکل ۷. نمودارهای پراکندگی برای ورق کامپوزیتی تحت بررسی



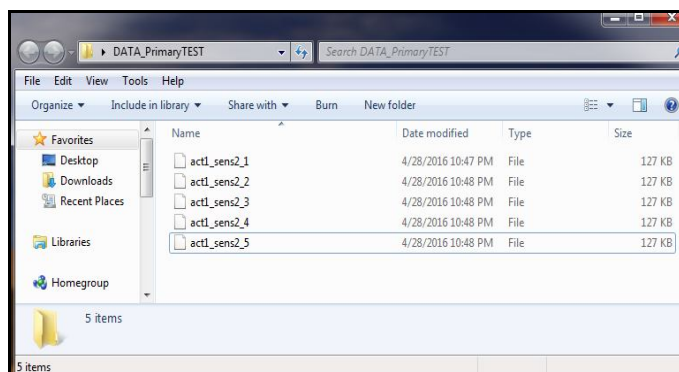
شکل ۸. ذخیره داده‌های دریافتی از اسیلوسکوپ با کد LabView

داده‌برداری در هربار آزمایش ۵ مرتبه تکرار شده و نهایتاً به ازای هر آزمایش (یک جفت محرک و حسگر) ۵ فایل، حاوی داده‌ها به‌دست آمد. در مرحله پردازش اطلاعات، داده‌های به‌دست آمده میانگین‌گیری شده تا ضمن افزایش قطعیت داده‌ها، حتی‌الامکان قبل از اعمال فیلترینگ، از میزان نوفه

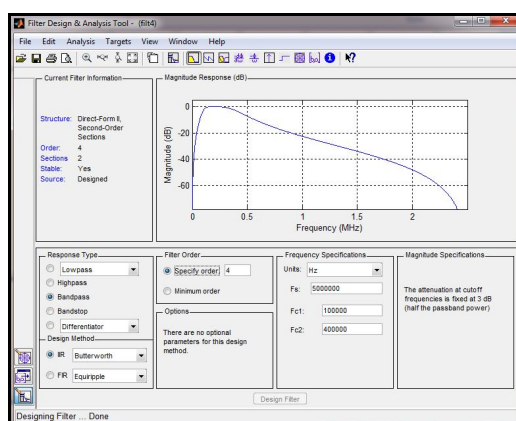
محیطی روی سیگنال‌ها نیز کاسته شود. در آزمایش مقدماتی برای پیش‌پردازش سیگنال‌ها و حذف نوفه از آنها، از فیلتر دیجیتال باتروث^{۱۱}، که یکی از فیلترهای مناسب برای این تحقیق و تحقیقات مشابه است، استفاده شد. این فیلتر نه‌تنها فرکانس‌های نامطلوب را حذف می‌کند، بلکه حساسیت

یکنواختی نسبت به فرکانس‌های عبوری دارد [۱۴]. برای اعمال فیلترینگ روی سیگنال‌های خام امواج لمب که در رایانه ذخیره شده بودند، از جعبه‌ابزار قدرتمند پردازش سیگنال در نرم‌افزار متلب استفاده گردید. جعبه‌ابزار پردازش سیگنال در نرم‌افزار مذکور امکان طراحی و اجرای انواع ابزارهای پردازش سیگنال از

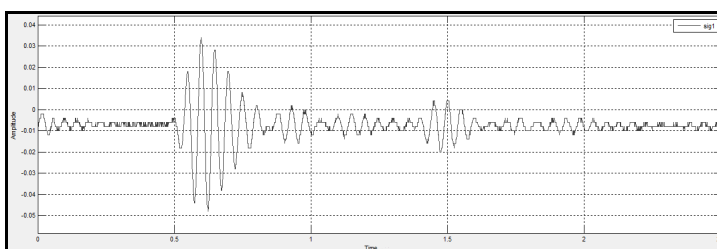
جمله طراحی و اعمال انواع فیلترهای متداول را ارائه می‌کند. داده‌ها پس از انتقال از فایل مربوطه در محیط کاری نرم‌افزار متلب از طریق ابزار SPTOOL فراخوانی شده و پس از طراحی فیلتر، روی سیگنال مورد نظر اعمال گردید. داده‌های سیگنال فیلترشده نیز مجدداً قابل ذخیره‌سازی و نمایش‌اند.



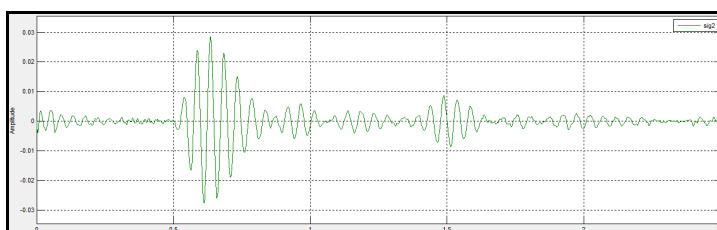
شکل ۹. فایل‌های مربوط به ۵ بار تکرار داده‌برداری در هر آزمایش



شکل ۱۰. طراحی فیلتر باتروث برای حذف نوفه از سیگنال‌ها



شکل ۱۱. سیگنال خام امواج لمب دریافت شده از سنسور



شکل ۱۲. سیگنال پس از اعمال فیلتر با وضوح و تقارن دامنه بهتر

چون فرکانس تحریک در حدود ۲۰۰ کیلوهرتز انتخاب شده بود، این فیلتر از نوع میان گذر با قابلیت عبور بازه ۱۰۰ تا ۴۰۰ کیلوهرتز از مرتبه ۴ با تواتر نمونه برداری 5E6 طراحی گردید که بهترین نتایج را داشت. با اعمال این فیلتر بر سیگنال امواج دریافتی، مؤلفه‌های 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 خواهند شد. چون بروز خرابی (شکاف) 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. 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، پردازش شود و اصطلاحاً محتوای پنهان آن با روش‌های مناسب و کارآمد آشکار گردد. به طور کلی هدف از پردازش سیگنال در موارد ذیل خلاصه می‌شود:

۱. حذف یا کاهش نوفه‌های محیطی که روی سیگنال اثر گذار بوده و موجب می‌شود اطلاعات اصلی سیگنال با ناخالصی و داده‌های بی‌فایده و بعضاً گمراه کننده همراه گردد
۲. تشکیل سیگنالی شفاف و آماده برای داده کاوی
۳. تحلیل اطلاعات زمانی و فرکانسی سیگنال
۴. دستیابی به محتوای پنهان (اطلاعات مستتر) در سیگنال

عملیات پردازش سیگنال باید قادر باشد ضمن رفع مشکلات و عوامل مزاحم، خواص مهمی از سیگنال از جمله، دامنه، فرکانس، انرژی، سرعت و زمان انتشار موج را از سیگنال خام استخراج نموده و آن را با استفاده از الگوریتم‌های مناسب به پارامترهای خرابی در سازه مرتبط سازد. پردازش سیگنال، در سه حوزه اصلی شامل زمان، فرکانس و زمان - فرکانس صورت پذیرفته که هر کدام از حوزه‌های یادشده دارای مزایا و نقائص خاص خود هستند. در این پژوهش از روش پردازش سیگنال در حوزه زمان موسوم به تحلیل دامنه موج و روش تلفیق 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 اوائل دهه ۵۰ م تبدیل موجک^{۱۳} در صنایع مختلف از جمله پردازش تصاویر، زلزله نگاری، زمین شناسی، علوم پزشکی و مهندسی توسعه فراوانی یافته است. در دهه ۹۰ م با تلاش‌های دوبشی و نیولند، آنالیز موجک کاربرد جدی و وسیعی در پردازش سیگنال‌های ارتعاشی پیدا کرده و سبب شد پس از آن، آنالیز موجک در حوزه ارزیابی‌های غیرمخرب مورد توجه ویژه قرار گیرد [۱۵-۱۶]. به طور خلاصه، موجک شکل موجی است که دارای مدت زمان یا اصطلاحاً پنجره محدودی است که میانگین دامنه آن صفر است. در واقع موجک در فارسی ترجمه کلمه 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 عبارت‌اند از آنالیز موجک پیوسته^{۱۳} و آنالیز موجک گسسته^{۱۴} که به طور عمده از نوع اول برای تحلیل داده‌های سیگنال و از نوع دوم برای کاهش نوفه‌های 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. مثلاً 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

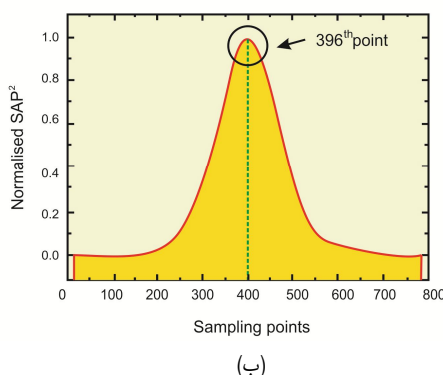
موجک پیوسته، شاخصی به نام SAP به صورت زیر تعریف می‌گردد:

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

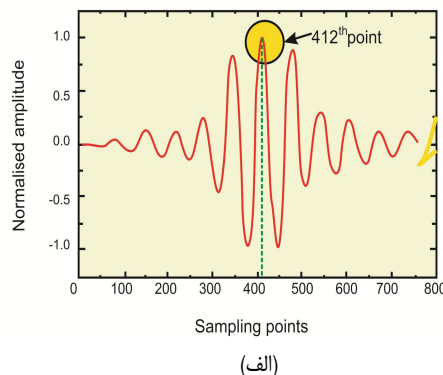
به طوری که M بزرگترین مقیاس در تبدیل موجک بوده و لذا میانگین انرژی عبوری با نماد E در بازه زمانی مورد نظر و شامل N نقطه داده برداری، از رابطه ۵ محاسبه خواهد شد.

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

مطابق شکل ۱۳ با استفاده از آنالیز موجک، براساس روش مشروح فوق، موج در نقطه ۳۹۶ به حداکثر میزان انرژی خود خواهد رسید در حالی که در حوزه زمان حداکثر دامنه موج در نقطه ۴۱۲ به حداکثر مقدار خود خواهد رسید. لذا براساس محاسبات و توضیحات فوق، اختلاف میزان محاسبه از دو روش مذکور، کمتر از ۵ درصد بوده که نشان می‌دهد هر دو روش از مقبولیت مناسبی برخوردارند [۷].



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 زمان - فرکانس استفاده کرد [۱۰]. در اکثر تحقیقات زمان رسیدن موج به بیشینه دامنه^{۱۵} 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 منتشرشده در سازه، در حوزه زمان است. از طرفی 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 ملاک رسیدن دامنه موج به مقدار بیشینه در نظر گرفت. یکی از روش‌های متداول، محاسبه میزان حداکثر انرژی سیگنال است که از طریق نمونه برداری از N نقطه به دست آمده است. با استفاده از مفاهیم و محاسبات آنالیز



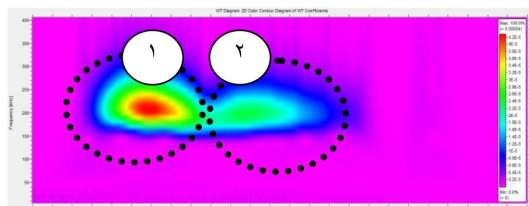
شکل ۱۳. الف) مقایسه تغییرات دامنه، ب) طیف انرژی

محسوب می‌شود؛ تا جایی که برخی از محققان شناسایی خرابی را مترادف با استخراج ویژگی می‌دانند [۱۷].

۶. استخراج داده‌ها

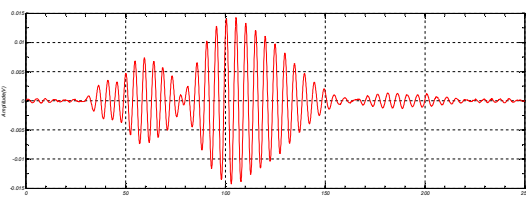
مطابق شکل ۱۴ می‌توان چند دسته موج یا به عبارت دیگر، چند مؤلفه اصلی در سیگنال به دست آمده از سازه سالم را به وضوح مشاهده کرد. سرعت گروه مربوط به کود نامتقارن امواج منتشره در ورق تحت آزمایش، مطابق حل معادلات امواج لمب و نمودار پراکندگی در شکل ۷ معادل ۳۴۰۰ متر بر ثانیه بوده که با احتساب فاصله ۱۲ سانتی متری محرک از حسگر، مدت زمان

مهمترین چالش در خصوص شناسایی عیوب سازه‌ای براساس 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 فرایند شناسایی خرابی توسط امواج لمب



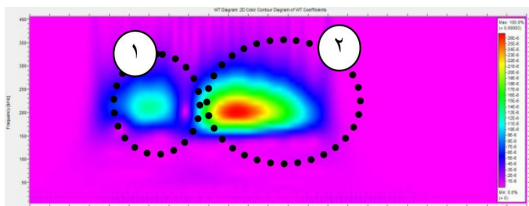
شکل ۱۵. تبدیل موجک روی سیگنال امواج لمب در ورق سالم از جنس الیاف کربن / اپوکسی

با ایجاد شکاف با زاویه ۴۵ درجه نسبت به ضلع افقی ورق و با عمق ۱ میلی‌متر، در شکل ۱۶ می‌توان ملاحظه نمود، در حوزه زمان، دامنه موج در مؤلفه اول، دچار افت بسیاری شدیدی شده که کاهش ضرایب موجک در خصوص مؤلفه اول، در حوزه تلفیقی زمان و فرکانس مطابق شکل ۱۷ نیز مؤید این موضوع است که می‌تواند عاملی برای شناسایی خرابی محسوب گردد. کاهش محدوده ضرایب موجک در مقایسه با سازه سالم، نشان از اتلاف انرژی بسیار زیاد موج هنگام عبور از شکاف داشته که تأثیر قابل ملاحظه این نوع از خرابی را آشکار می‌سازد.



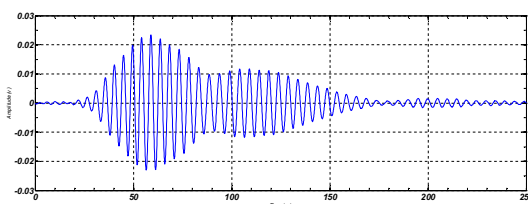
شکل ۱۶. امواج فراصوت در ورق الیاف کربن / اپوکسی با وجود شکاف

برای تمایز بهتر مؤلفه‌های موج منتشره در سازه معیوب و بررسی محتوای فرکانسی آن، باز هم از آنالیز موجک استفاده شده که نتایج آن در شکل ۱۷ مشخص می‌باشد. هرچند نمودار سیگنال در حوزه زمان به خوبی متمایز بودن دو مؤلفه موج را نشان می‌دهد، اما در تصویر مربوط به سیگنال در حوزه مشترک زمان و فرکانس این تمایز به همراه برآوردی از تمرکز انرژی در موقعیت‌های زمانی مختلف نیز با وضوح بیشتری آشکار است.



شکل ۱۷. تبدیل موجک روی سیگنال امواج لمب در ورق معیوب از جنس الیاف کربن / اپوکسی

رسیدن موج به حسگر باید در حدود ۳۵ میکروثانیه باشد. با اندازه‌گیری زمان رسیدن اولین جبهه موج به حسگر از طریق بررسی داده‌های حاصل از آزمایش، مطابق شکل ۱۴ زمان مذکور معادل ۳۱ میکروثانیه بود که تطابق مناسبی است. اختلاف میان مقدار تجربی حاصل از آزمایش و مقدار حاصل از حل معادله امواج لمب و نمودار پراکندگی می‌تواند به دلیل خطای آزمایش یا خطای استخراج خواص مکانیکی ورق کامپوزیتی باشد که قابل اغماض است و هیچ تأثیری بر نتایج آزمایش ندارد. بر این اساس، با توجه به نمودار پراکندگی و محاسبات فوق، می‌توان چنین استنباط کرد که مؤلفه اول موج مربوط به مود پایه غیرمتقارن است و مؤلفه دوم، مؤلفه‌ای با ماهیت بازتابی، حاصل از عبور مجدد موج از حسگر پس از برخورد با مرزهای آزاد ورق است. در این آزمایش مود متقارن پایه، که باید در حوالی زمان ۱۷ میکروثانیه مشاهده می‌شد، احتمالاً به دلیل ضعیف بودن دامنه و خواص میرایی قابل توجه ورق کامپوزیتی ساخته شده قابل تشخیص نبوده و آثار آن در سیگنال ثبت شده رویت نمی‌گردد و به همین جهت استفاده از مود نامتقارن پایه کاملاً کاربردی است [۱۸].



با شکل ۱۴. امواج فراصوت در ورق کامپوزیتی سالم

انجام آنالیز موجک تحت تابع گابور روی سیگنال، تداخل نه‌چندان شدید دو مؤلفه موج، در شکل ۱۵ با وضوح بیشتری آشکار شده که البته به کمک قابلیت‌های تبدیل موجک به خوبی قابل تمایزند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان ضرایب موجک در مؤلفه اول موج و در زمان تقریبی ۵۸ میکروثانیه در محدوده فرکانسی ۲۰۰ کیلوهرتز، که همان محدوده فرکانس تحریک می‌باشد، بیشترین مقدار خود را دارد که نشانگر تمرکز بیشترین میزان انرژی موج در مؤلفه اول موج است. این زمان مربوط به بیشینه مقدار ضرایب موجک است که براساس اصل تشریح شده در شکل ۱۳ تطابق خوبی با زمان مربوط به بیشینه شدن دامنه موج، در همان محدوده زمانی دارد.

۷. تحلیل و تفسیر نتایج

نتایج کلی حاصل از آزمایش را می‌توان در قالب موارد ذیل به صورت خلاصه بیان نمود:

هرچند مؤلفه اصلی و بازتابش شده از خرابی یا لبه‌های ورق همپوشانی مختصری داشته و در واقع مجزا هستند، اما از استفاده از آنالیز موجک برای تمایز بهتر مؤلفه‌های امواج لمب و تحلیل دقیق‌تر نتایج، بسیار مناسب‌تر می‌باشد.

بهره‌گیری از مؤلفه اول موج به عنوان معیار مناسب برای مقایسه حالت سالم و معیوب به دلیل تمرکز بیشترین مقدار انرژی موجود (متناسب با ضریب موجک) و عدم وجود آثار بازتابی از لبه‌های ورق، باعث وضوح بیشتر نتایج می‌گردد.

در مقایسه بین دو حالت سالم و معیوب، کاهش شدید مقدار بیشینه ضرایب موجک، که براساس تحلیل در حوزه مشترک زمان و فرکانس حاصل شده است، نشان از کاهش انرژی امواج پس از عبور از شکاف دارد. کاهش دامنه مؤلفه اول موج نیز مؤید همین موضوع با مفاهیم موجود در مباحث پردازش سیگنال در حوزه زمان است.

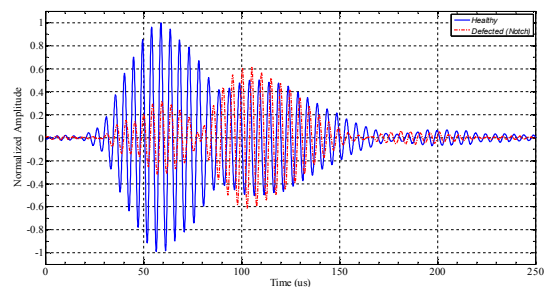
پیرو بحث نظری مطرح شده در شکل ۱۳، تطابق زمانی قابل قبولی بین آنالیز امواج در حوزه زمان و حوزه تلفیقی زمان و فرکانس در خصوص زمان رخداد بیشترین مقدار دامنه موج وجود دارد.

شکل موج، محدوده فرکانسی و فاز برای هر دو مؤلفه، در هر دو حالت سالم و معیوب بودن سازه، با وجود تفاوت در دامنه و تأخیر زمانی (به علت وجود خرابی)، تطابق بسیار مناسبی با هم دارند. این تطابق می‌تواند به نوعی تأییدکننده دقت آزمایش در هر دو حالت مذکور باشد.

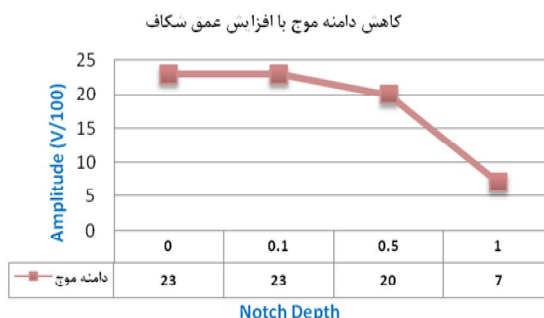
زمان رسیدن دامنه موج به مقدار حداکثر برای مؤلفه اول موج، در هر دو حالت سالم و معیوب بودن سازه، مطابق شکل ۱۸ اندکی متفاوت بوده که نشانگر ایجاد تأخیر زمانی^{۱۶} در انتشار مؤلفه اول موج به دلیل حضور شکاف است. با اینحال به دلیل نزدیکی فاصله محرک و حسگر این تأخیر زمانی بسیار اندک است و از آن برای تحلیل نتایج استفاده نشد.

در حالت وجود شکاف در ورق، دو مؤلفه اصلی موج از هم فاصله بیشتری گرفته که این امر می‌تواند به دلیل ایجاد تأخیر زمانی در رسیدن مؤلفه دوم موج به حسگر، در حالت وجود شکاف در ورق باشد.

در شکل ۱۸ مقایسه رخداد دو اتفاق مهم شامل کاهش دامنه مؤلفه اول موج و افزایش دامنه مؤلفه دوم، می‌تواند مهمترین معیار برای وجود خرابی (شکاف) در ورق باشد. مطابق شکل مذکور، کاهش دامنه مؤلفه اول موج در صورت وجود شکاف، نسبت به حالت بدون عیب، به حدی است که این کاهش، کاملاً در تصویر آشکار است. با این حال افزایش دامنه مؤلفه دوم موج، که البته می‌تواند ماهیتی بازتابی داشته باشد، به دلیل برخورد این بازتاب به ناحیه شکاف است که در این صورت خرابی به مانند یک تقویت‌کننده دامنه سیگنال موج عمل می‌کند. افزایش میزان ضرایب موجک در مؤلفه دوم موج در شکل ۱۷ به وضوح قابل مشاهده است. برای طراحی شاخص خرابی در حوزه زمان، به منظور ایجاد ارتباط میان ویژگی موج (دامنه مؤلفه اول) با مشخصات خرابی (عمق شکاف)، مطابق شکل ۱۹ نمودار ارتباط دامنه مؤلفه اول موج با ابعاد (عمق) شکاف ترسیم شده که به خوبی بیانگر کاهش اندازه دامنه مؤلفه اول موج با افزایش یافتن عمق شکاف، البته به صورت کاملاً غیرخطی است. از این نمودار می‌توان برای طراحی شاخص خرابی برای تخمین شدت خرابی (شکاف) در ورق کامپوزیتی تحت آزمایش استفاده کرد.



شکل ۱۸. سیگنال در ورق سالم و معیوب (شکاف با عمق ۱ میلی‌متر)



شکل ۱۹. ارتباط میان افزایش عمق شکاف با کاهش دامنه امواج لمب در ورق کامپوزیتی

برای ایجاد ارتباط میان ویژگی‌های سیگنال با مشخصات خرابی می‌توان از میزان کاهش دامنه موج متناسب با تغییر ابعاد شکاف (عمق) استفاده نموده و با ایجاد ارتباط میان دو پارامتر مذکور نسبت به طراحی شاخص خرابی، برای تخمین ابعاد شکاف در ورق استفاده نمود. هرچند توجه به این نکته ضروری است که تأثیر افزایش عمق شکاف بر میزان کاهش دامنه مؤلفه اول موج، کاملاً غیرخطی بوده و احتمالاً رفتاری پیچیده دارد که این موضوع لزوم بررسی مسئله در حالات مختلف و افزایش موارد داده‌برداری را مشخص می‌سازد.

۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله با طراحی و اجرای یک سامانه پایش سلامت سازه ورق کامپوزیتی براساس تغییر در ویژگی‌های سیگنال در حوزه زمان و حوزه مشترک زمان و فرکانس، شامل تغییر در دامنه و تغییر در بیشینه مقدار ضرایب موج، امکان شناسایی خرابی در ورق کامپوزیتی ایجاد شد. با کالیبره کردن و ایجاد ارتباط میان تغییرات ویژگی سیگنال در حوزه زمان (تغییرات دامنه) با مشخصات خرابی (عمق شکاف)، شاخص خرابی برای پیش‌بینی شدت خرابی حاصل شد. هرچند ضروری است به دلیل پیچیدگی موضوع، تعداد موارد داده‌برداری و تکرار آزمایش با ابعاد مختلف و متنوع برای شکاف، به صورت جدی مد نظر قرار گیرد. استفاده از تبدیل موجک سبب شد تمایز میان مؤلفه‌های مختلف موج، که دچار تداخل و همپوشانی هستند، با وضوح بیشتری صورت پذیرفته و استخراج ویژگی‌های سیگنال با سهولت انجام گردد. با

۹. مأخذ

مقایسه بیشینه ضرایب موجک برای مؤلفه اول موج در هر دو حالت سالم و معیوب سازه، به عنوان خروجی پردازش سیگنال در حوزه زمان و فرکانس، امکان شناسایی خرابی در سازه به عنوان راه حل دوم فراهم شد. هنگام عبور موج از خرابی، به دلیل کاهش انرژی آن، دامنه موج و ضرایب موجک مرتبط با آن دچار کاهش قابل توجه گردید. این در حالی است در خصوص مؤلفه‌های بازتابی موج به دلیل آثار خرابی که ممکن است به مثابه یک منبع تقویت‌کننده موج عمل کند، امکان افزایش دامنه وجود دارد. هرچند مطابق اصول نظری، هنگام عبور موج از خرابی، تأخیر زمانی، نسبت به سازه سالم اتفاق خواهد افتاد، اما در این آزمایش با وجود مشاهده تأخیر زمانی در نمودارهای مقایسه‌ای سیگنال‌ها، میزان این تأخیر بسیار اندک بود که می‌تواند به دلیل نزدیکی فاصله محرک و حسگر باشد. افزودن ویژگی‌های دیگر از سیگنال، به شاخص خرابی و طراحی شاخص‌های ترکیبی، از مواردی است که در تحقیقات آینده مدنظر قرار گرفته و به تحلیل‌های دقیق‌تری منجر خواهد شد.

قدردانی

از جناب آقای دکتر یوسفی‌کما، استاد محترم دانشگاه تهران، و جناب آقای مهندس سعید ظهوری، مسئول گروه ارتعاشات در مرکز سیستم‌ها و فناوری‌های پیشرفته دانشکده مکانیک دانشگاه تهران، برای راهنمایی، مساعدت و ارائه مجوز حضور در آزمایشگاه و استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی آن مرکز، تشکر و قدردانی می‌گردد.

- [1] Aurtar K. Kaw, *Mechanics of composite Materials*, CRC Press, 2006.
- [2] Ben, Ratnam, Yang, *Ultrasonic based method for damage identification in composite materials*, Springer Science and Business Media, B.V., 2012.
- [3] Bing Li, Lin Ye, Zheng Li, Zhaoyang Ma, and Hamed Kalhori, Quantitative identification of delamination at different interfaces using guided wave signals in composite laminates, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* (2015): 0731684415593815.
- [4] Holger Speckmann, Henrik Roesner, *Structural Health Monitoring: A Contribution to the Intelligent Aircraft Structure*, ECNDT-Tu.1.1.1, 2006.
- [5] Victor Giurgiutiu, *Structural Health Monitoring*, Academic Press, 2007.
- [6] Daniel Balageas, Claus-Peter Fritzen, Alfredo Güemes, *Structural Health Monitoring*, 2006.
- [7] Zhongqing, Su, Lin Ye, *Identification of damage using Lamb waves: from fundamentals to applications*, Vol. 48. Springer Science & Business Media, 2009.

- [8] Z. Su, 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*, 2007.
- [9] Z. Su, Lin Ye, Xiongzhu Bu, A damage identification technique for CF/EP composite laminates using distributed piezoelectric transducers, 2002.
- [10] J. L. Rose, *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge University Press, 2014.
- [11] Standard, ASTM Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, ASTM D3039/D3039M, 1995.
- [12] MATLAB Language Reference, The language of technical computing, MathWorks, Inc. 2008.
- [13] L. Wang, F. G. Yuan, Group velocity and characteristic wave curves of Lamb waves in composites: modeling and experiments, *Composites Science and Technology*, Vol. 67, pp. 1370-1384, 2007.
- [14] S. T. Karris, Signal and Systems with MATLAB Computing and Simulink modelling, 2014.
- [15] The Math Works, MATLAB, Inc, Wavelet Toolbox (User's Guide), version R2015b.
- [16] C. Torrence, G. Compo, A Practical guide to wavelet analysis, *American Meteorological Society*, 1998.
- [17] Liu, Xinglong, Chengxu Zhou, Zhongwei Jiang, Damage localization in plate-like structure using built-in PZT sensor network, *Smart Structures and Systems*, 2012.
- [18] Wang, Dong, et al. Quantitative identification of multiple damage in laminated composite beams using A_0 Lamb mode, *Journal of Composite Materials*, 2011.

پی‌نوشت

-
- 1. non-destructive evaluation
 - 2. structural health monitoring
 - 3. piezoelectric transducer
 - 4. Lamb waves
 - 5. dispersion curves
 - 6. carbon fiber reinforced epoxy (CFRE)
 - 7. AMP Composites Co. Ltd.
 - 8. quasi-isotropic
 - 9. vacuum infusion process
 - 10. MATLAB
 - 11. Butterworth
 - 12. wavelet
 - 13. continuous wavelet transform
 - 14. discontinuous wavelet transform
 - 15. time of flight
 - 16. time lag