

پایش سلامت ورقهای کامپوزیتی از نوع پلیمر تقویت شده با الیاف کربن مبتنی بر امواج فراصوت هدایت شده بر پایه آنالیز موجک

محمد ریاحی^۱*

مرکز آزمونهای غیر مجرب پیشرفته دانشگاه علم و صنعت

علیرضا احمدی^۲

مرکز آزمونهای غیر مجرب پیشرفته دانشگاه علم و صنعت

چکیده

استفاده از ورقهای کامپوزیتی چندلایه، به عنوان اجزای اصلی در ساخت سازه های نوین، نظیر بدنه یا بال هواپیماها کاربرد فراوانی یافته است. با این حال، آسیب پذیری مواد کامپوزیتی در برابر عواملی محیطی نظیر برخورد اشیاء مختلف که منجر به ایجاد عیوبی نظیر شکاف، سوراخ یا جدایش بین لایه ای می گردد، موضوعی چالش برانگیز است. شناسایی صحیح و به موقع انواع آسیب در سازه های کامپوزیتی می تواند نقش بسزایی در جلوگیری از رخداد حوادث و فجایع به خصوص در صنایع حساس و مهم نظیر صنعت هوافضا داشته باشد. به دلیل مزایای فراوان از جمله توانایی پیمایش در فواصل طولانی، امکان حرکت در مسیرهای غیر مستقیم و حساسیت مناسب به انواع خرابی، به ابزاری مناسب برای ایجاد سامانه های پایش سلامت سازه ای تبدیل شده که برتری های آن نسبت به آزمونهای غیرمخرب متداول از جمله آزمون غیرمخرب معمول با امواج فراصوت به اثبات رسیده است. در این مقاله، با طراحی و ایجاد یک سامانه پایش سلامت سازه ای مبتنی بر امواج لمب، نسبت به شناسایی خرابی شامل شکاف در یک ورق کامپوزیتی از نوع پلیمر تقویت شده با الیاف کربن اقدام گردیده و نتایج حاصل از آن با هدف توسعه این روش برای شناسایی خرابی در موقعیتهای مشابه، تحلیل شده است. استفاده از مبدل های پیزوالکتریک با نقش دوگانه محرک و سنسور با بکارگیری مفاهیم و روشهای پردازش سیگنال در حوزه زمان و حوزه تلفیقی زمان و فرکانس نظیر تبدیل موجک همراه با طراحی یک شاخص خرابی ساده برای تعیین شدت نسبی شکاف در ورق تحت بررسی، از ویژگیهای تحقیق حاضر، محسوب می گردد.

لغات کلیدی: پایش سلامت سازه ای، آزمونهای غیرمخرب، امواج فراصوت هدایت شده، ورق کامپوزیتی، تبدیل موجک.

۱-مقدمه

مواد کامپوزیتی 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 تک جهته گرافیت/اپوکسی می تواند مشابه فولاد باشد اما استحکام ویژه آن سه برابر فولاد است که این موضوع می تواند به معنای کاهش وزن سازه کامپوزیتی در عین حفظ استحکام آن باشد (کاو^۳، ۲۰۰۶). با وجود کاربرد فراوان و رو به رشد مواد کامپوزیتی در مصارف گوناگون صنعتی، سازه های کامپوزیتی بالاخص در صنایع مهم و حساس نظیر هوافضا و سازه های عمرانی باید کاملاً تحت نظر و مراقبت باشند. هر چند سازه های کامپوزیتی مزایای فراوانی دارند لیکن به هنگام رخداد خرابی، تقریباً بدون نشانه و هشدار خاصی، به شکل فاجعه آمیزی دچار شکست می شوند. آسیبهای ناشی از برخورد اجسام که منجر به خرابیهایی از نوع شکاف یا سوراخ می شوند، گونه ای 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 می تواند به از هم گسیختگی سازه کامپوزیتی منجر شود (لی و همکاران^۴، ۲۰۱۵). نظر به محدودیت های موجود در اجرای روشهای معمول ارزیابی غیرمخرب، از قبیل عدم کارایی مناسب در شناسایی برخی عیوب به خصوص در مواد کامپوزیتی به دلیل ساختار پیچیده این مواد، نیاز به روشهای نوین بیش از پیش احساس می شود. به عنوان مثال نیاز به امکان دسترسی مستقیم به ناحیه تحت بازرسی در روشهای ارزیابی غیرمخرب و از آنجا که این امر تنها در زمان انجام عملیات نگهداری و تعمیر با خارج شدن سازه از حالت عملیاتی امکان پذیر

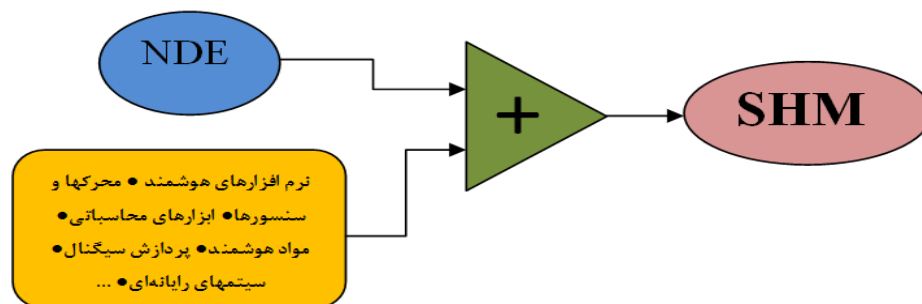
¹ riahi@iust.ac.ir

² research@alireza-ahmadi.com

³ Kaw

⁴ Li

است، انجام بازرسی‌های مداوم و مستمر، مبتنی بر آزمونهای غیرمخرب متداول از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود (برگمن^۱، ۲۰۱۲). پایش سلامت سازه‌ای، جایگزینی جدید و خلاقانه برای روشهای معمول ارزیابی غیرمخرب است که باعث اطمینان از عدم وجود عیوب در سازه می‌شود. 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 روشهای ارزیابی غیرمخرب با استفاده از ابزارهای نوین نظیر محرکها، سنسورها، نرم افزارهای هوشمند و پردازشهای رایانه‌ای، قابل تبدیل به روشهای پایش سلامت سازه‌ای می‌باشند (گویرگیوتیو^۲، ۲۰۰۸).



شکل (۱). ارتباط معنایی ارزیابی غیرمخرب با پایش سلامت سازه ای

پایش سلامت سازه‌ای، را می‌توان نوعی فناوری دانست که به صورت 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 سنسورهایی 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 (اسپکمن و رویسنر^۳، ۲۰۰۶):

- نصب سنسورها به صورت دائمی در بدنه سازه
- عدم نیاز به دسترسی فیزیکی مستقیم به سازه
- ایمنی بالا در بازرسی نواحی حساس و خطرناک از سازه
- عدم نیاز به ابزارهای پیمایش نقطه ای یا خطی
- بازرسی خودکار و مکانیزه
- امکان بررسی چندین نقطه از سازه به صورت همزمان
- کاهش تاثیر تفاسیر و خطاهای انسانی در فرآیند بازرسی

از میان روشهای مختلف طراحی و پیاده سازی سامانه‌های مبتنی بر پایش سلامت سازه ای، استفاده از امواج فراصوت هدایت شده در سالهای اخیر به خصوص در پایش سلامت سازه های ورقی کامپوزیتی، رشد چشمگیری داشته است. در این رهیافت با وجود روشهای مختلف ارسال و دریافت امواج مذکور، استفاده از مبدلهای پیزوالکتریک به دلیل وزن سبک و قیمت مقرون به صرفه در کنار سهولت استفاده، راهکاری مناسب و روبه توسعه است. در این روش سیگنال امواج فراصوت هدایت شده 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. در مراحل تکمیلی، با پردازش سیگنال امواج، تعیین مشخصات خرابی نیز امکان پذیر خواهد بود (بالاگیس و همکاران^۴، ۲۰۰۶).

۲- اصول و تئوری امواج لمب

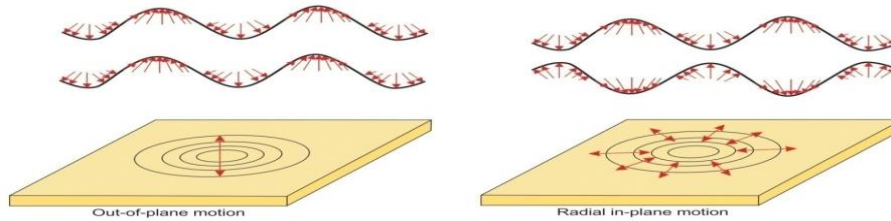
¹ Brigman

² Giurgiutiu

³ Speckmann and Roesner

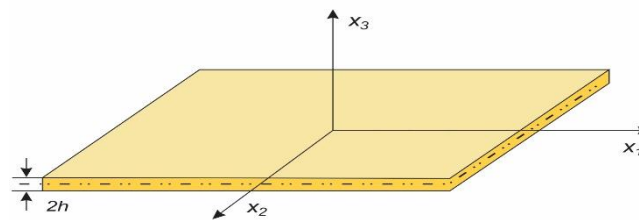
⁴ Balageas

امواج لمب به عنوان امواج فراصوت هدایت شده در سازه های ورق، محسوب شده که قادر به حرکت در سازه های 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 می کند که به همین دلیل به این امواج، هدایت شده می گویند.



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

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 می گردد. مود متقارن با نماد S_i و مود نامتقارن با نماد A_i شناخته شده که اندیس آن مربوط به مرتبه مود مذکور می باشد. به عنوان مثال دو مود بسیار پرکاربرد که اصلاحا مودهای مرتبه صفر یا مودهای پایه شناخته می شوند با نمادهای A_0 و S_0 تعریف می شوند. 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 $2h$

$$\mu \cdot u_{i,jj} + (\mu + \lambda) u_{j,ji} + \rho \cdot f_i = \rho \cdot \ddot{u}_i \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (1)$$

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. ضمناً λ ثابت لامه است. با انجام محاسبات و حل معادلات، نهایتاً می توان معادله فوق را به دو بخش مجزا مربوط به مودهای متقارن و نامتقارن تجزیه کرد. از این معادلات برای ترسیم نمودارهای پراکندگی^۱ که در واقع گام اول تعیین پارامترهای طراحی آزمایش محسوب می گردد استفاده خواهد شد. لازم به ذکر است با انجام تغییراتی در این معادلات می توان آن را به ورقهای چند لایه نیز تعمیم داد (رز^۲، ۲۰۱۴).

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

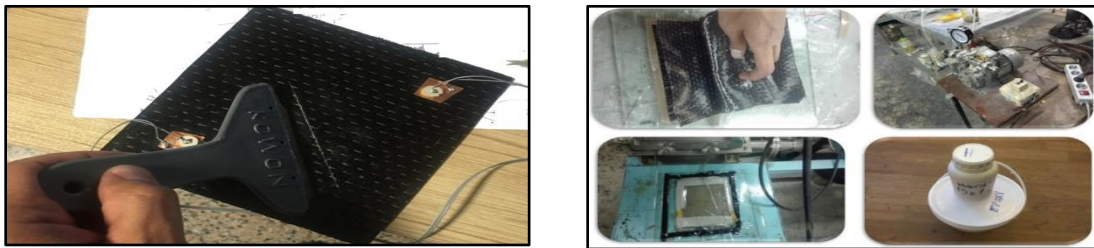
$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(k^2 - q^2)^2}{4k^2 qp} \quad \text{برای مودهای نامتقارن}$$

¹ Dispersion Curves

² Rose

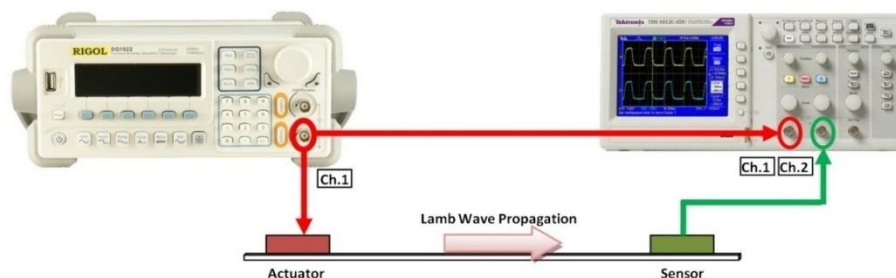
۳- طراحی و پیکربندی آزمایش

هدف از این تحقیق طراحی سامانه پایش سلامت سازه ای در ورق کامپوزیتی از جنس پلیمر تقویت شده با الیاف کربن بود. الیاف مورد نیاز برای ساخت نمونه از جنس الیاف کربن تک جهته بوده و رزین استفاده شده از نوع اپوکسی بیسفنول که با نسبت حدود ۱۲٪ با ماده سفت کننده ترکیب گردید. لایه چینی^{۱۱} ورق به صورت [0/-45/45/90] در ۸ لایه و در نتیجه شبه همسانگرد^{۱۲} 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 در خلا^{۱۳} ساخت شد که یکی از ورقها با کیفیت ساخت بهتر با ابعاد ۱۵۰*۱۵۰ میلیمتر برای انجام آزمایش انتخاب گردید.



(شکل ۴) - فرآیند ساخت ورق کامپوزیتی و ایجاد خرابی در آن 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 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 میلیمتر با فرکانس مرکزی ۲۰۰ کیلوهرتز استفاده گردید. مبدل‌های پیزوالکتریک با استفاده از چسب مناسب و با استفاده از یک فویل رسانای مسی بر 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 سنسورها با تجهیزات ارسال پالس تحریک و دریافت سیگنال منتشر شده در سازه فراهم گردید که تصویر شماتیک آن در شکل (۵) قابل مشاهده است. رنگ قرمز مربوط به مسیر پالس تحریک و رنگ سبز مربوط به مسیر امواج لمب منتشر شده در ورق می باشد.



(شکل ۵). تصویر شماتیک پیکربندی آزمایش

جهت ایجاد پالس تحریک از یک دستگاه فانکشن ژنراتور از نوع RIGOL DG 1022 استفاده شد. ایجاد چند نوع شکل موج متنوع و حتی

¹¹ Lay-Up

¹² Quasi-Isotropic

¹³ Vacuum Infusion Process

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^{۱۴} در پنل آن از مزایای این دستگاه می باشد. برای مشاهده، دیجیتال کردن و ذخیره سازی سیگنالهای مربوط به امواج لمب که توسط سنسورها از ورق کامپوزیتی دریافت می شوند، از یک دستگاه اسیلوسکوپ دیجیتال از نوع Tektronix TDS 1012C-SC با پهنای باند ۴۰ مگاهرتز، نرخ نمونه برداری یک گیگا سمپل بر ثانیه، دارای دو کانال، قابلیت برنامه ریزی و 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 می باشد.



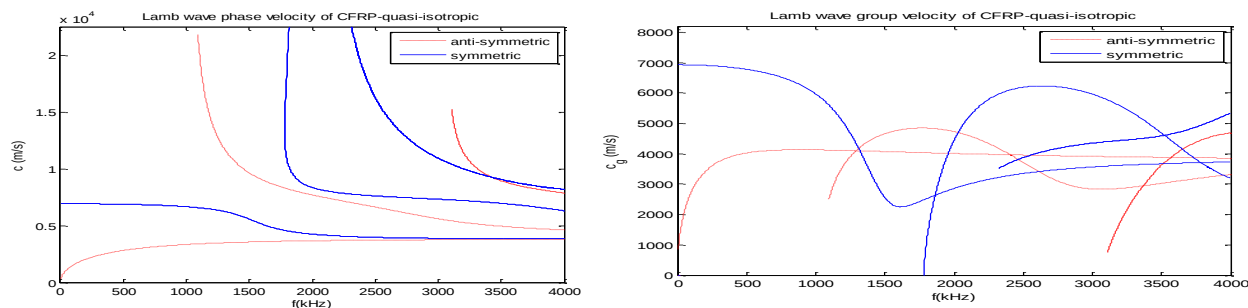
شکل (۶). برپایی پیکربندی آزمایش و اتصال نمونه به تجهیزات آزمایشگاهی

۴-انجام آزمایش و استخراج داده ها

با استخراج خواص مکانیکی ورق مطابق با جدول (۱)، نمودارهای پراکندگی مربوط به نحوه انتشار امواج لمب در سازه کامپوزیتی، ترسیم گردید.

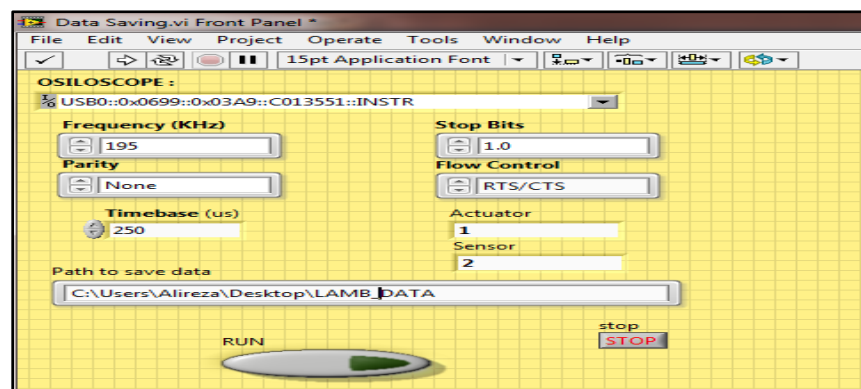
جدول (۱). خواص مکانیکی ورق کامپوزیتی تحت بررسی	
خواص مکانیکی	ورق الیاف کربن/اپوکسی
چگالی Kg/m ³	۱۶۰۰
مدول ینگ GPa	۷۰
ضریب پواسون (ν _{۱۲})	۰/۳
ضخامت ورق (mm)	۲

نمودارهای پراکندگی برای ورق تحت بررسی، با حل معادله حاصل از رابطه (۲) از روشهای حل عددی (گویرگیوتیو، ۲۰۰۵) و با استفاده از برنامه نوشته شده در محیط نرم افزار MATLAB مطابق شکل (۷) می باشد.



شکل (۷). نمودارهای پراکندگی برای ورق کامپوزیتی تحت بررسی

با توجه به نمودارهای پراکندگی و از آنجا که 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 نمی گردد 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 ۱۹۵ کیلوهرتز و دامنه ۲۰ ولت نقطه به نقطه استفاده شد که بیشترین مقدار دامنه را برای امواج خروجی بر روی صفحه اسیلوسکوپ ایجاد می نمود. شکل موج سینوسی به دلیل دوره ای 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 نمی توان 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 عیب یابی 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 بیتشری خواهند بود. یکی از چالش های مهم در این پژوهش عدم وجود 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 دستگاه های 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 داده های آنالوگ توسط اسیلوسکوپ دیجیتال لازم بود داده ها برای ذخیره دائمی از حافظه اسیلوسکوپ به حافظه دائمی رایانه انتقال یابند.

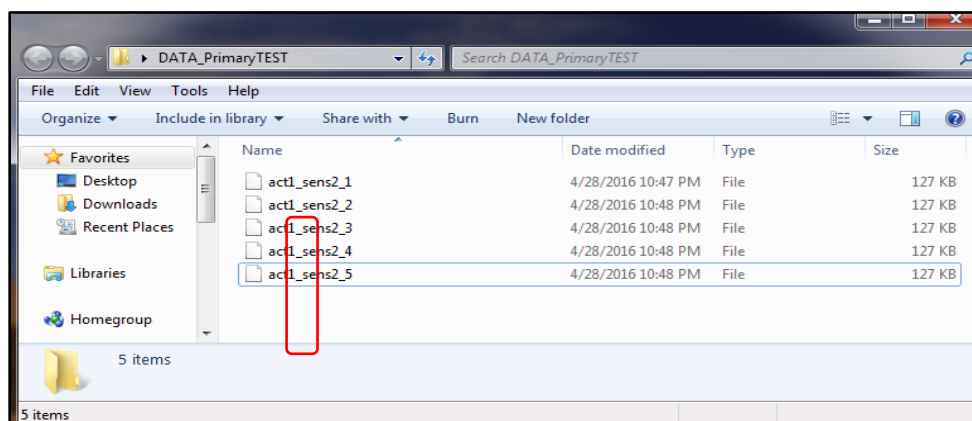


شکل (۸). ذخیره داده های دریافتی از اسیلوسکوپ با کد LabView

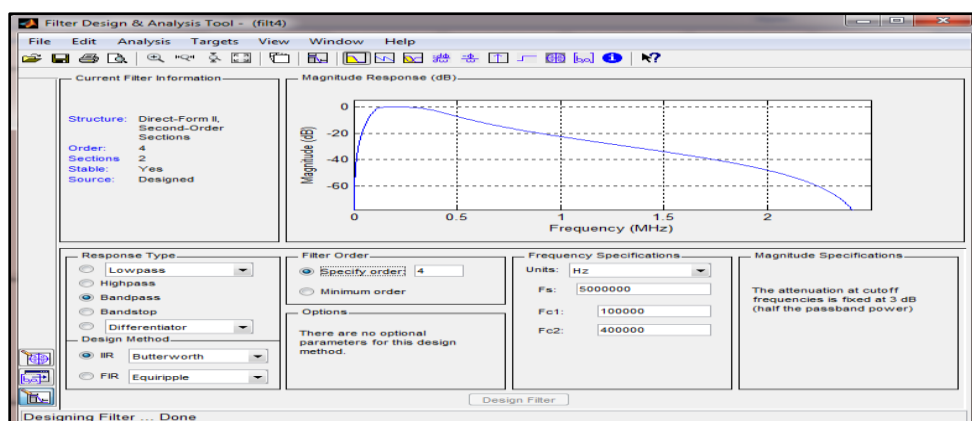
اسیلوسکوپ دیجیتال از طریق پورت USB به رایانه متصل شده تا امکان انتقال اطلاعات از طریق یک نرم افزار واسط بوجود آید. هر چند بسیاری از اسیلوسکوپ های دیجیتال دارای نرم افزار ذخیره اطلاعات هستند اما در این تحقیق برای ذخیره اطلاعات و در واقع انتقال داده ها از اسیلوسکوپ به رایانه نسبت به ایجاد کد نرم افزاری که در محیط LabView آماده شده بود، مطابق شکل (۸) اقدام گردید. داده برداری در هر بار آزمایش ۵ مرتبه تکرار شده و نهایتاً به ازای هر آزمایش (یک جفت محرک و سنسور) ۵ فایل، حاوی داده ها بدست آمد. در مرحله پردازش اطلاعات، داده های بدست آمده میانگین گیری شده تا ضمن افزایش قطعیت داده ها، حتی الامکان قبل از اعمال فیلترینگ، از میزان نویز محیطی روی سیگنالها نیز کاسته شود. در آزمایش مقدماتی برای پیش پردازش سیگنالها و حذف نویز از آنها، از فیلتر دیجیتال باترورث^{۱۵} که یکی از فیلترهای مناسب برای این تحقیق و تحقیقات مشابه می باشد، استفاده شد. این فیلتر نه تنها فرکانس های نامطلوب را حذف می کند بلکه حساسیت یکنواختی نسبت به فرکانس های عبوری دارد (کاریس^{۱۶}، ۲۰۰۷).

¹⁵ Butterworth filter

¹⁶ Karis

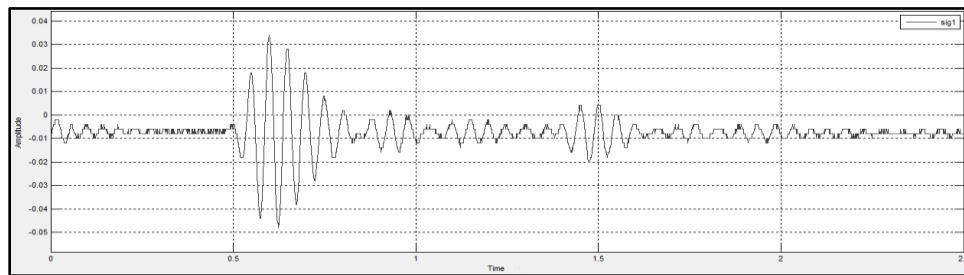


شکل (۹). فایل‌های مربوط به ۵ بار تکرار داده برداری در هر آزمایش

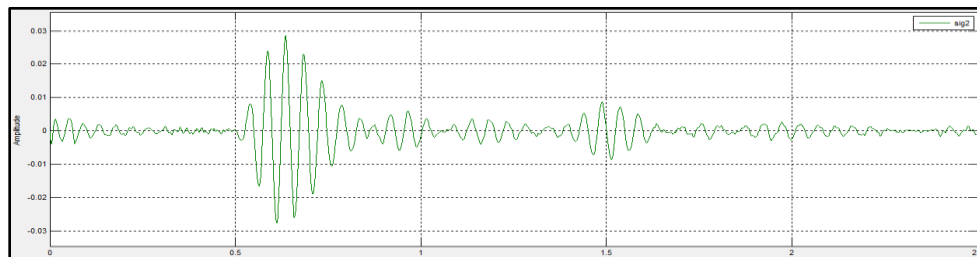


شکل (۱۰). طراحی فیلتر باترورت برای حذف نویز از سیگنالها در محیط MATLAB

برای اعمال فیلترینگ بر روی سیگنالهای خام امواج لمب که در رایانه ذخیره شده بودند، از جعبه ابزار قدرتمند پردازش سیگنال در نرم افزار MATLAB استفاده گردید. جعبه ابزار پردازش سیگنال در نرم افزار مذکور امکان طراحی و اجرای انواع ابزارهای پردازش سیگنال از جمله طراحی و اعمال انواع فیلترهای متداول را ارائه می کند. داده های ذخیره شده پس از انتقال از فایل مربوطه در محیط کاری نرم افزار MATLAB از طریق ابزار SPTOOL فراخوانی شده و پس از طراحی فیلتر، بر روی سیگنال موردنظر اعمال گردید. داده های سیگنال فیلتر شده نیز مجدداً قابل ذخیره سازی و نمایش هستند. از آنجا که 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 توانر نمونه برداری 5E6، طراحی گردید که بهترین نتایج را داشت. با اعمال این فیلتر بر روی سیگنال امواج دریافتی، مولفه های 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 داده های مربوط به سیگنال امواج لمب که در ورق منتشر شده است، در مراحل بعد با استفاده از روشهای پردازش سیگنال، داده های جمع آوری شده مورد بررسی و تحلیل گرفته و این داده ها تبدیل به اطلاعات سودمند و قابل تحلیل خواهند شد. از آنجا که بروز خرابی (شکاف) در ورق، موجب تغییر خواص مکانیکی و یکپارچگی ورق می گردد، 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، می توان به معیار مناسبی برای تشخیص خرابی در سازه دست یافت. خلاصه ای از پیکربندی، کلیه پارامترهای طراحی و تنظیمات آزمایش، که در بخشهای فوق الذکر معرفی گردید، در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل (۱۱). سیگنال خام امواج لمب دریافت شده از سنسور بدون اعمال فیلتر



شکل (۱۲). سیگنال امواج لمب پس از اعمال فیلتر با وضوح و تقارن دامنه بهتر

جدول (۲). پارامترها و تنظیمات آزمایش

نوع نمونه	ورق کامپوزیتی
جنس نمونه	الیاف کربن / اپوکسی - الیاف تک جهت
ابعاد	۱۵۰*۱۵۰ با ضخامت ۲ میلیمتر
چیدمان لایه‌ای	[0/-45/45/90]
مشخصات نمونه تحت بررسی	خواص مکانیکی ورق کامپوزیتی مشخصات خرابی ایجاد شده فاصله وصله‌های پیزوالکتریک ابعاد مبدل‌های پیزوالکتریک نحوه اتصال مبدل‌ها به ورق فاکشن ژنراتور
تجهیزات سخت افزاری	اسیلوسکوپ دیجیتال شکل موج نوع پالس تعداد سیکل ولتاژ فرکانس ذخیره داده ها تعداد نقاط داده برداری کل زمان داده برداری تعداد عملیات داده برداری نمایش سیگنال (نمودار)
پالس تحریک	تعداد سیکل ولتاژ فرکانس ذخیره داده ها تعداد نقاط داده برداری کل زمان داده برداری تعداد عملیات داده برداری نمایش سیگنال (نمودار)
پردازش سیگنال	تعداد سیکل ولتاژ فرکانس ذخیره داده ها تعداد نقاط داده برداری کل زمان داده برداری تعداد عملیات داده برداری نمایش سیگنال (نمودار)
	سینوسی Burst تک پالس ۲۰ ولت (نقطه به نقطه) 195 KHz نرم افزار LabView ۲۵۰۰ ۲۵۰ میکروثانیه ۵ بار در هر مرحله با اخذ میانگین نرم افزار Matlab

فیلتر باترورث مرتبه ۴ - نرم افزار Matlab	فیلترینگ سیگنال
حوزه زمان - نرم افزار Matlab	پردازش
حوزه زمان و فرکانس با استفاده از آنالیز موجک پیوسته (CWT) تحت	پردازش پیشرفته
تابع موجک مادر از نوع گابور	

۵- پردازش سیگنالهای امواج لمب

به دسته‌ای مرتبط از داده‌ها که شامل اطلاعاتی از یک ویژگی یا حالتی از یک سازه یا مجموعه می باشد، 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 داده ها، 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 می شود:

- حذف یا کاهش نویزهای محیطی که روی سیگنال اثر گذار بوده و موجب می شود اطلاعات اصلی سیگنال با ناخالصی و داده‌های بی فایده و بعضاً گمراه کننده همراه گردد
 - تشکیل سیگنالی شفاف و آماده برای داده کاوی
 - تحلیل اطلاعات زمانی و فرکانسی سیگنال
 - 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 حوزه های یاد شده دارای مزایا و نقایص خاص خود هستند. در این تحقیق از روش پردازش سیگنال در حوزه زمان موسوم به تحلیل دامنه موج و روش زمان - فرکانس با نام تبدیل موجک استفاده شده که یکی از کارآمدترین روشهای پردازش سیگنال محسوب می گردد.



شکل (۱۳). حوزه های متداول پردازش سیگنالهای امواج لمب

با توسعه روشهای تحلیل اطلاعات در حوزه زمان - فرکانس از اوایل دهه ۵۰ میلادی تبدیل موجک^{۱۷} 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 دوبشی 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 اصطلاحاً پنجره محدودی است که

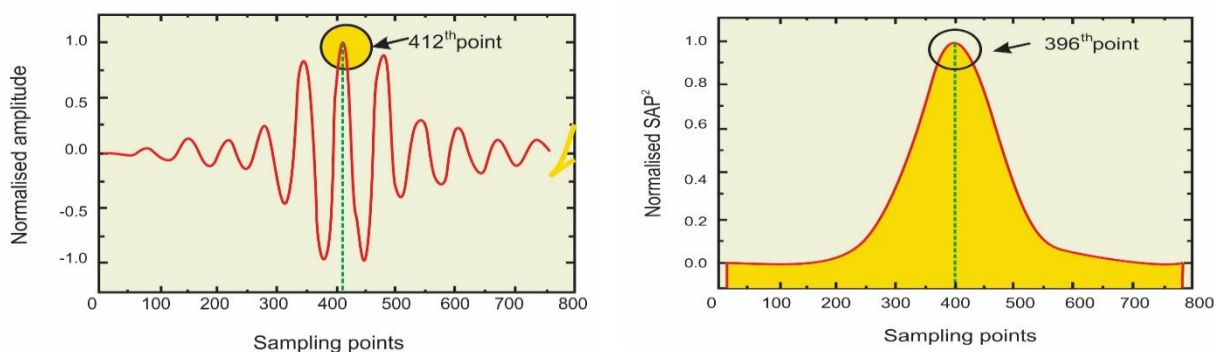
¹⁷ Wavelet

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 عبارتند از آنالیز موجک پیوسته و آنالیز موجک گسسته که به طور عمده از نوع اول برای تحلیل داده های سیگنال و از نوع دومی برای کاهش نویزهای سیگنال استفاده می شود. 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:

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

که در آن $\psi * \psi$ بخش مختلط تابع $\psi(t)$ و $CWT(a,b)$ ضریب تبدیل موجک پیوسته می باشد. به عنوان مثال خروجی CWT می تواند 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 می توان برای تعیین توزیع انرژی مربوط به سیگنال مذکور در حوزه زمان - فرکانس استفاده کرد (میسیتی و میسیتی^{۱۸}، ۲۰۱۰). در اکثر تحقیقات زمان رسیدن موج به قله یا TOF^{19} در حوزه زمان یکی از مهمترین ویژگیهای سیگنال تحت بررسی محسوب می گردد، 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 می دانیم، انتشار موج در واقع انتقال انرژی از طریق بسته موج است. لذا می توان اختلاف زمانی میان رسیدن موج به حداکثر مقدار انرژی در هنگام انتشار با مقدار انرژی در زمان شروع انتشار موج را به عنوان TOF در نظر گرفت. یکی از روشهای متداول، محاسبه میزان حداکثر انرژی سیگنال می باشد 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:

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



شکل ۱۴. محاسبه TOF بر اساس دامنه (اول) و طیف انرژی (دوم)

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.

¹⁸ Misiti and Misiti

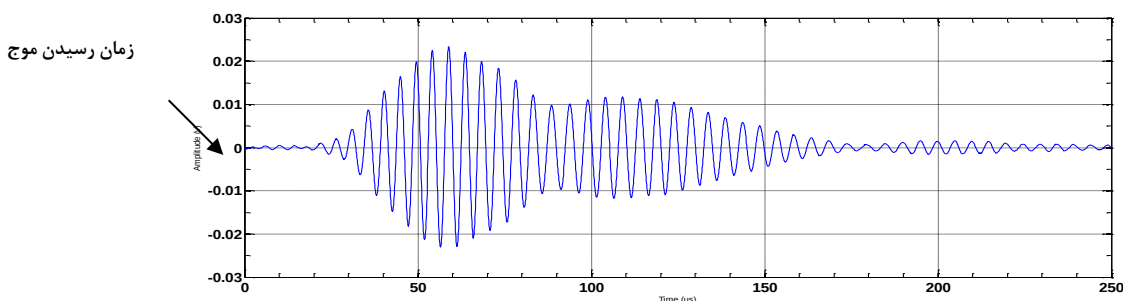
¹⁹ Time of Flight

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

مطابق شکل (۱۴) با استفاده از آنالیز موجک، بر اساس روش مشروح فوق، موج در نقطه ۳۹۶ به حداکثر میزان انرژی خود خواهد رسید در حالیکه در حوزه زمان حداکثر دامنه موج در نقطه ۴۱۲ به حداکثر مقدار خود خواهد رسید. لذا بر اساس محاسبات و توضیحات فوق‌الذکر، اختلاف میزان محاسبه TOF از دو روش مذکور، کمتر از ۵٪ بوده که نشان می‌دهد هر دو روش از مقبولیت مناسبی برخوردارند (سو و همکاران^{۲۰}، ۲۰۰۷). 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 شناسایی خرابی را مترادف با استخراج ویژگی می‌دانند.

۶- تحلیل داده ها و استخراج ویژگیهای سیگنالها

مطابق شکل (۱۵) می‌توان چند دسته موج یا به عبارت دیگر چند مولفه اصلی را در سیگنال بدست آمده از سازه سالم، به وضوح مشاهده نمود. سرعت گروه^{۲۱} مربوط به امواج لمب 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 سنسور، مدت زمان رسیدن موج به سنسور باید در حدود ۳۵ میکروثانیه باشد. با اندازه گیری زمان رسیدن اولین جبهه موج^{۲۲} به سنسور از طریق بررسی داده های حاصل از آزمایش، مطابق شکل (۱۵) زمان مذکور معادل ۳۱ میکروثانیه بوده که تطابق مناسبی است. اختلاف میان مقدار تجربی حاصل از آزمایش و مقدار بدست آمده از حل معادله امواج لمب و نمودار پراکندگی می‌تواند به دلیل خطای آزمایش یا خطای استخراج خواص مکانیکی ورق کامپوزیتی باشد که قابل اغماض بوده و هیچگونه تاثیری در نتایج آزمایش ندارد. بر این اساس با توجه به نمودار پراکندگی و محاسبات فوق، می‌توان چنین استنباط نمود که مولفه اول موج مربوط به مود پایه غیرمستقر بوده و مولفه دوم، مولفه‌ای با ماهیت بازتابی، حاصل از عبور مجدد موج از سنسور پس از برخورد با مرزهای آزاد ورق است. در این آزمایش مود متقارن پایه که باید در حوالی زمان ۱۷ میکروثانیه مشاهده می‌گردید، احتمالاً به دلیل ضعیف بودن دامنه و خواص میرایی قابل توجه ورق کامپوزیتی ساخته شده، قابل تشخیص نبوده و اثرات آن در سیگنال ثبت شده رویت نمی‌گردد.



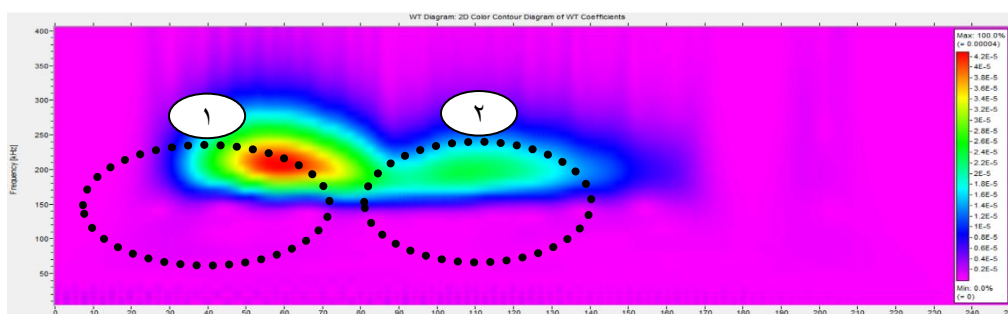
شکل (۱۵). سیگنال امواج لمب در ورق کامپوزیتی سالم از جنس الیاف کربن/اپوکسی

²⁰ Su

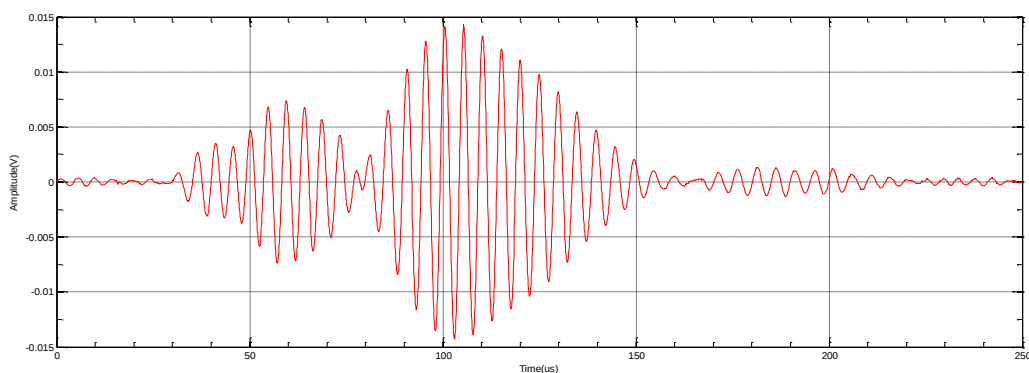
²¹ Group Velocity

²² Time of Arrival

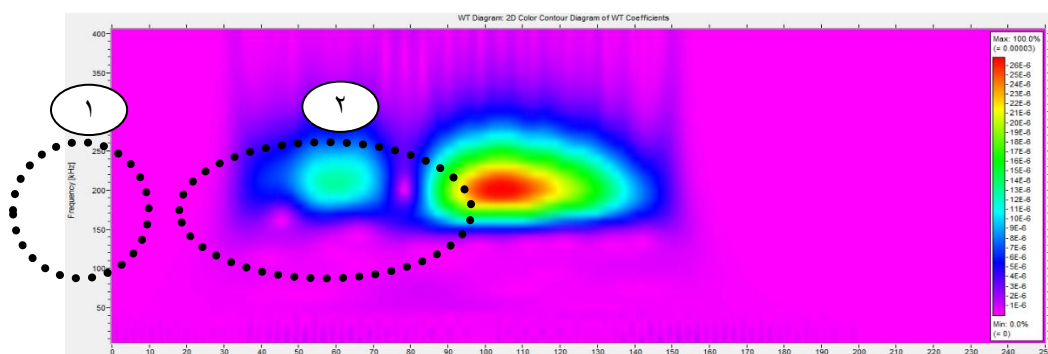
با انجام آنالیز موجک تحت تابع گابور، بر روی سیگنال، تداخل نه چندان شدید دو مولفه موج، در شکل (۱۶) با وضوح بیشتری آشکار شده که البته به کمک قابلیت‌های تبدیل موجک به خوبی قابل تمایز هستند. همانطور که مشاهده می شود، میزان ضرایب موجک در مولفه اول موج و در زمان تقریبی ۵۸ میکروثانیه در محدوده فرکانسی ۲۰۰ کیلوهرتز که همان محدوده فرکانس تحریک می باشد، بیشترین مقدار خود را دارد که نشانگر تمرکز بیشترین میزان انرژی موج در مولفه اول موج میباشد. این زمان مربوط به بیشینه مقدار ضرایب موجک بوده که بر اساس اصل تشریح شده در شکل (۱۴) تطابق خوبی با زمان مربوط به بیشینه شدن دامنه موج، در همان محدوده زمانی دارد. با ایجاد شکاف با زاویه ۴۵ درجه نسبت به ضلع افقی ورق و با عمق ۱ میلیمتر، در شکل (۱۷) می توان ملاحظه نمود، در حوزه زمان، دامنه موج در مولفه اول، دچار افت بسیار شدیدی گردیده که کاهش ضرایب موجک در خصوص مولفه اول، در حوزه زمان – فرکانس مطابق شکل (۱۸) نیز موید این موضوع است که می تواند 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 تاثیر قابل ملاحظه این نوع از خرابی را آشکار می سازد. برای تمایز بهتر مولفه‌های موج منتشره در سازه معیوب و بررسی محتوای فرکانسی آن، باز هم از آنالیز موجک استفاده شده که نتایج آن در شکل (۱۸) مشخص می باشد. هر چند نمودار سیگنال در حوزه زمان به خوبی متمایز بودن دو مولفه موج را نشان می دهد، لیکن در تصویر مربوط به سیگنال در حوزه زمان – فرکانس این تمایز به همراه برآوردی از تمرکز انرژی در موقعیتهای زمانی مختلف نیز با وضوح بیشتری آشکار است. در شکل (۱۸) جدا شدن و تفکیک کامل دو مولفه موج از یکدیگر، در مقایسه با شکل (۱۶)، می تواند مبین وجود تاخیر بیشتر در رسیدن مولفه بازتابی، هنگام رسیدن به سنسور، نسبت به حالت سالم سازه باشد که این تاخیر زمانی مستقیماً به وجود خرابی در سازه مرتبط است. در شکل مقایسه ای (۱۹) رخداد دو اتفاق مهم شامل کاهش دامنه مولفه اول موج و افزایش دامنه مولفه دوم، می تواند مهمترین معیار برای وجود خرابی (شکاف) در ورق باشد. مطابق شکل مذکور، کاهش دامنه مولفه اول موج در صورت وجود شکاف (رنگ قرمز) نسبت به حالت بدون عیب (رنگ آبی)، به حدی است که این کاهش، کاملاً آشکار است. با این حال افزایش دامنه مولفه 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 تقویت کننده دامنه سیگنال موج عمل می کند. افزایش میزان ضرایب موجک در مولفه دوم موج در شکل (۱۸) به وضوح قابل مشاهده است.



شکل (۱۶). آنالیز موجک سیگنال امواج لمب در ورق سالم از جنس الیاف کربن/اپوکسی

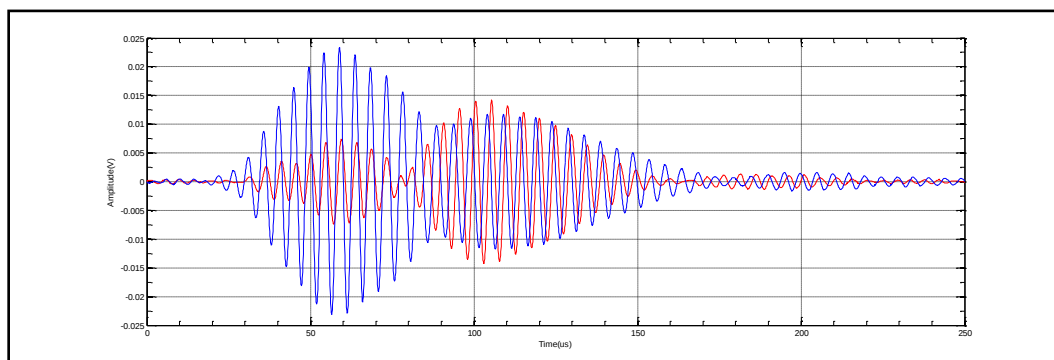


شکل (۱۷). سیگنال امواج لمب در ورق الیاف کربن/اپوکسی با وجود شکاف

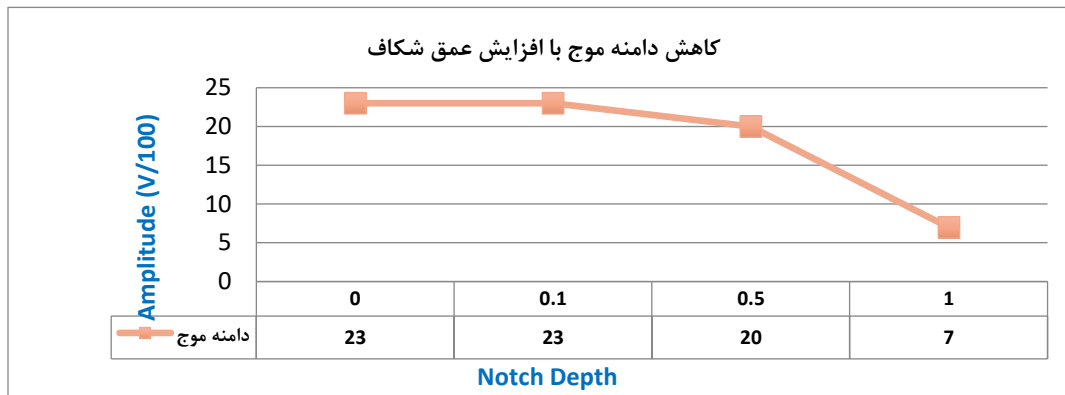


شکل (۱۸) - آنالیز موجک سیگنال امواج لمب در ورق معیوب از جنس الیاف کربن/اپوکسی

برای طراحی شاخص خرابی در حوزه زمان، به منظور ایجاد ارتباط میان ویژگی موج (دامنه مولفه اول) با مشخصات خرابی (عمق شکاف)، مطابق شکل (۲۰) نمودار ارتباط دامنه مولفه اول موج با ابعاد (عمق) شکاف ترسیم شده که به خوبی بیانگر کاهش اندازه دامنه مولفه اول موج با افزایش یافتن عمق شکاف، البته به صورت کاملاً غیر خطی است. از این نمودار می‌توان برای طراحی شاخص خرابی برای تخمین شدت خرابی (شکاف) در ورق کامپوزیتی تحت آزمایش استفاده نمود. افزودن ویژگیهای دیگر از سیگنال، به شاخص خرابی، از مواردی است که می‌تواند در تحقیقات آینده مدنظر قرار گرفته و به تحلیلهای دقیقتری منجر شود.



شکل (۱۹). مقایسه سیگنال امواج لمب در ورق سالم و معیوب (شکاف با عمق ۱ میلیمتر)



شکل (۲۰) - ارتباط میان افزایش عمق شکاف با کاهش دامنه امواج لمب در ورق کامپوزیتی

۷- تحلیل و تفسیر نتایج

نتایج کلی حاصل از آزمایش را می توان در قالب موارد ذیل به صورت خلاصه این گونه بیان نمود:

- هر چند مولفه اصلی و مولفه بازتابش شده از خرابی یا لبه های ورق همپوشانی مختصری داشته و در واقع مجزا هستند، لیکن از آنالیز موجک برای تمایز بهتر مولفه های امواج لمب و تحلیل دقیقتر نتایج استفاده گردید.
- از مولفه اول موج به عنوان معیار مناسب برای مقایسه حالت سالم و معیوب به دلیل تمرکز بیشترین مقدار انرژی موجود (متناسب با ضریب موجک) استفاده گردید.
- در مقایسه بین دو حالت سالم و معیوب، کاهش شدید مقدار بیشینه ضرایب موجک، که بر اساس تحلیل در حوزه زمان - فرکانس حاصل شده است، نشان از کاهش انرژی امواج پس از عبور از شکاف دارد. کاهش دامنه مولفه اول موج نیز موید همین موضوع با مفاهیم موجود در پردازش سیگنال در حوزه زمان است.
- پیرو بحث نظری مطرح شده در شکل (۱۴)، تطابق زمانی قابل قبول بین آنالیز امواج در حوزه زمان و حوزه تلفیقی زمان - فرکانس در خصوص زمان رخداد بیشترین مقدار دامنه موج (ToF)، وجود دارد.
- شکل موج، محدوده فرکانسی و فاز برای هر دو مولفه، در هر دو حالت سالم و معیوب بودن سازه، با وجود تفاوت در دامنه و تاخیر زمانی (به علت وجود خرابی)، تطابق بسیار مناسبی با یکدیگر دارند. این تطابق می تواند به نوعی تایید کننده دقت آزمایش در هر دو حالت مذکور باشد.
- زمان رسیدن دامنه موج به قله (ToF) برای مولفه اول موج، در هر دو حالت سالم و معیوب بودن سازه، مطابق شکل (۱۹) اندکی متفاوت بوده که نشانگر ایجاد تاخیر زمانی در انتشار مولفه اول موج به دلیل حضور شکاف است. با این حال به دلیل نزدیکی فاصله محرک و سنسور این تاخیر زمانی بسیار اندک است. لازم به ذکر است، تاخیر زمانی مذکور در خصوص مولفه دوم موج که ماهیتی بازتابی دارد، بیشتر بوده که می تواند موید تاثیر بیشتر خرابی بر ایجاد تاخیر زمانی در خصوص مولفه های بازتابی باشد.
- در حالت وجود شکاف در ورق، دو مولفه اصلی موج از یکدیگر فاصله بیشتری گرفته که این امر به دلیل ایجاد تاخیر زمانی در رسیدن مولفه دوم موج به سنسور، در حالت وجود شکاف در ورق است. وجود این تاخیر زمانی می تواند ناشی از کاهش سرعت مولفه بازتابی موج به دلیل وجود خرابی و ایجاد تغییر در خواص مکانیکی ورق، باشد.
- برای ایجاد ارتباط میان ویژگیهای موج با مشخصات خرابی، می توان 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 مطلوب، برای تخمین ابعاد شکاف در ورق استفاده نمود. هر چند توجه به این نکته ضروری است که تاثیر افزایش عمق شکاف بر میزان کاهش دامنه مولفه اول موج، کاملاً غیر خطی بوده و احتمالاً رفتاری پیچیده دارد که این موضوع لزوم بررسی مساله در حالات مختلف و ضروری بودن افزایش

موارد داده برداری را مشخص می سازد.

۸- جمع بندی نهایی

در این تحقیق با توجه به تغییر در ویژگیهای سیگنال در حوزه زمان و زمان - فرکانس، شامل تغییر در دامنه و تغییر در بیشینه مقدار ضرایب موجک، امکان شناسایی خرابی در ورق کامپوزیتی ایجاد گردید. با کالیبره کردن و ایجاد ارتباط میان تغییرات ویژگی سیگنال در حوزه زمان (تغییرات دامنه) با مشخصات خرابی (عمق شکاف)، شاخص خرابی برای پیش بینی شدت خرابی حاصل شد. هر چند ضروری است به دلیل پیچیدگی موضوع، تعداد موارد داده برداری و تکرار آزمایش با ابعاد مختلف و متنوع برای شکاف، به صورت جدی مدنظر قرار گیرد. استفاده از آنالیز موجک سبب گردید، تمایز میان مولفه های مختلف موج که دچار تداخل و همپوشانی هستند، با وضوح بیشتری انجام پذیرفته و استخراج ویژگیهای سیگنال با سهولت انجام پذیرد. با مقایسه بیشینه ضرایب موجک برای مولفه اول موج در هر دو حالت سالم و معیوب سازه، به عنوان خروجی پردازش سیگنال در حوزه زمان - 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 مولفه های بازتابی موج به دلیل اثرات خرابی که ممکن است به مثابه یک منبع تقویت کننده موج عمل کند، امکان افزایش دامنه وجود دارد. هر چند هنگام عبور موج از خرابی، تاخیر زمانی، اتفاق خواهد افتاد اما در این آزمایش با وجود مشاهده تاخیر زمانی در نمودارهای مقایسه ای سیگنالها، میزان این تاخیر بسیار اندک بود که می تواند به دلیل نزدیکی فاصله محرک و سنسور باشد. در آزمایشهای انجام شده، مشاهده گردید، تاخیر زمانی مربوط به مولفه های بازتابی بیش از مولفه های عبوری و مستقیم موج منتشره شده در سازه است.

مراجع

- Kaw, A.K. (2006). *Mechanics of composite Materials. Taylor & Francis group.*
- Li, B., Ye, L., Li, Z., Ma, Z., & Kalhori, H. (2015). Quantitative identification of delamination at different interfaces using guided wave signals in composite laminates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(18), 1506-1525.
- Brigman, N. N. A. (2012). *Structural health monitoring in commercial aviation* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Giurgiutiu, V. (2008). *Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors.*
- Speckmann, H., Roesner, H. (2006). *Structural Health Monitoring: A Contribution to the Intelligent Aircraft Structure. ECNDT - Tu.1.1.1.*
- Balageas, D., Fritzen, C-P., Güemes, A. (2006). *Structural Health Monitoring.*
- Rose, J. L., (2014). *Ultrasonic guided waves in solid media. Pen. State university, Cambridge University Press.*
- Giurgiutiu, V., & Cuc, A. (2005). Embedded non-destructive evaluation for structural health monitoring, damage detection, and failure prevention. *Shock and Vibration Digest*, 37(2), 83.
- Karis, S. T. (2007). *Signal and Systems with matlab computing*, orchard publication.
- Misiti, M., Misiti, Y. (2010). *Wavelet toolbox user's Guide. Mathworks.*
- Su, Z., Wang, X., Chen, Z., & Ye, L. (2007). A hierarchical data fusion scheme for identifying multi-damage in composite structures with a built-in sensor network. *Smart Materials and Structures*, 16(6), 2067.