

بررسی تجربی رفتار انتشاری امواج فراصوت هدایت شده به منظور ارزیابی غیرمخرب ورق‌های چندلایه کامپوزیتی

محمد ریاحی*
علیرضا احمدی

استاد، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، riahi@iust.ac.ir
 کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، مرکز آزمون‌های غیرمخرب پیشرفته دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، ahmadi92@alumni.iust.ac.ir

چکیده

در این پژوهش با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال، ضمن بررسی تجربی رفتار انتشاری امواج فراصوت هدایت شده، در یک ورق کامپوزیتی از جنس پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه، نسبت به تحلیل تغییرات سیگنال امواج اقدام شده است. ابتدا با طراحی مسیرهای متعدد انتشار امواج، بر اساس شبکه‌ای از مبدل‌های پیزوالکتریک با نقش دوگانه محرک و حسگر، سطح ورق به چهار ناحیه شامل نواحی سالم، دچار تورق، شکاف و سوراخ تقسیم شد. در ادامه با تعریف دو نوع شاخص خرابی، ذیل مفاهیم تبدیل موجک، اقدام به استخراج ویژگی از سیگنال‌های مرتبط با هر یک از نواحی چهارگانه در قالب ۴۰ مسیر و ۹ وضعیت مقایسه‌ای گردید. در نهایت تاثیر هر یک از انواع خرابی‌ها بر روی سیگنال امواج، در قالب بررسی مقادیر عددی شاخص‌های خرابی، در حوزه مشترک زمان و فرکانس، تحت مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد، تغییرات رفتار امواج، متأثر از وجود خرابی در سازه که در تفاوت مقادیر عددی شاخص‌های خرابی آشکار می‌گردد، موجب شناسایی و تمایز عیوب گوناگون در سازه ورق کامپوزیتی شده و جایگزینی مقرون به صرفه و مناسب برای آزمون‌های غیرمخرب متداول است. **واژه‌های کلیدی:** پایش سلامت سازه‌ای، امواج فراصوت هدایت شده، ورق‌های کامپوزیتی، تبدیل موجک، شاخص خرابی.

Experimental Study of Ultrasonic Guided Waves Propagation for Non-Destructive Evaluation of Multi-layer Composite Plates

M. Riahi
A. R. Ahmadi

Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
 Advanced NDT center of Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Abstract

In this study, by using signal processing methods, the propagation behavior of the waves in a GF/EP composite plate is practically investigated, and the propagated wave signals variations is analyzed as well. First, multiple paths of signal propagation was designed, based on a network of piezoelectric transducers, which have a dual role of excitor and sensor, which demarcates the plate into four areas, comprising healthy, with delamination, hole and notch areas. Then by defining two types of damage indexes, under the concept of wavelet transform, the extraction features of the signals associated with each of the four areas in 40 directions and 9 conditions are compared. In the final step, the effect of each damage on the signal waves, by applying the numerical values of the damage indexes, at the joint time and frequency domain, was studied. The results show that by the proposed method, it is possible to detect and distinguish the wave behavior analysis affected by different damages in the structure; furthermore, it is a reasonable and convenient alternative technique for the conventional nondestructive testing.

Keywords: Structural health monitoring, Ultrasonic guided waves, Composite plates, wavelet transform, Damage Index.

و برای رفع آن اقدام نمود از اهمیت بالایی برخوردار است. سال‌های متمادی آزمون‌های غیرمخرب^۱ از جمله آزمون فراصوتی^۲ و جریان گردابی^۳ به عنوان ستون فقرات فرآیند شناسایی عیوب و تضمین سلامت سازه‌ها مطرح بوده‌اند. لیکن آزمون‌های غیرمخرب با نواقصی روبرو هستند که از آن جمله می‌توان به دو موضوع اصلی ذیل اشاره نمود. موضوع اول، خارج شدن سازه از حالت عملیاتی در زمان بازرسی، لزوم دسترسی مستقیم به نواحی مختلف تحت بررسی و همچنین پیمایش نقطه به نقطه تمام نواحی و در نتیجه، طولانی شدن زمان بازرسی است که از نواقص عملیاتی به شمار می‌روند^۳. موضوع دوم، محدودیت‌هایی است که آزمون‌های غیرمخرب در خصوص مواد کامپوزیتی به دلیل ساختار غیرهمگن و غیرهمسانگرد این مواد دارند. لذا در مواردی این شیوه برای شناسایی عیوب در مواد کامپوزیتی دارای کاستی‌های مهمی است^۴. به همین دلیل، حرکت به سمت روش‌های نوین مبتنی بر فلسفه‌های جدید در فرآیند نگهداری و تعمیرات ذیل عنوان نگهداری بر

۱- مقدمه

امروزه شاهد افزایش کاربرد مواد کامپوزیتی از جنس پلیمرهای تقویت شده با الیاف^۱، در انواع صنایع از جمله خودروسازی، هوافضا و سازه‌های عمرانی هستیم. نسبت استحکام به وزن عالی، مقاومت در برابر خوردگی و خستگی و همچنین انعطاف پذیری در طراحی و تولید، از جمله خواص جالب توجه این مواد است^۱. با تمام این مزایا، سازه‌های کامپوزیتی از جمله سازه‌های حساس هوافضایی در معرض انواع خطرات از جمله برخورد اشیاء مختلف از قبیل خرده سنگ‌های روی باند پرواز، پرنده‌گان، تگرگ و سایر عوامل بوده و به همین دلیل آسیب‌پذیری قابل توجه‌ای دارند به طوری که به سرعت و در بسیاری از موارد بدون علائم مشخص قبلی، خواص مکانیکی و استحکام اولیه خود را در صورت رخداد حوادث مذکور از دست خواهند داد^۲. بر این اساس، استفاده از روش‌هایی که بتوان به کمک آنها، خرابی را در مراحل اولیه پیدایش، به درستی تشخیص داده

² Non-Destructive tests

³ Ultrasonic test

⁴ Eddy current

¹ Fiber reinforced polymer.

اساس شرایط^۱ امری اجتناب ناپذیر است.

پایش سلامت سازه‌های^۲ به عنوان نسل جدید و جایگزین روش‌های بازرسی مبتنی بر ارزیابی غیرمخرب هر چند نقاط اشتراک فراوانی با آزمون‌های غیرمخرب دارد اما به دلیل استفاده از مولفه‌ها و ابزارهایی نظیر محرک‌ها، حسگرها، پردازش‌های رایانه‌ای و حتی الگوریتم‌های هوش مصنوعی امکان تحلیل بلادرنگ داده‌های مربوط به سلامت نواحی مختلف سازه به منظور تشخیص هر چه سریع‌تر خرابی‌ها را با هزینه‌ای به مراتب کمتر و البته با دقت بیشتر به وجود آورده است. مطابق برخی مطالعات، در صورت اجرای روش‌های پایش سلامت سازه-ای در حوزه ناوگان هوایی، کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات تا ۳۰ درصد در مقایسه با آزمون‌های غیرمخرب متداول، امکان پذیر است [۵]. یکی از روش‌های پرکاربرد و موثر برای ایجاد و توسعه سامانه پایش سلامت سازه‌ای استفاده از امواج فراصوتی است که به سه دسته امواج حجمی، سطحی و ورقی تقسیم می‌شود. نوع آخر، قابلیت انتشار در ورق‌ها در فواصل طولانی را داشته و مرزهای آزاد ورق، امواج را در مسیر مرزها هدایت می‌کنند. به همین دلیل به این امواج، اصطلاحاً امواج فراصوت هدایت شده^۳ نیز می‌گویند.

این امواج برای اولین بار توسط هورس لمب^۴ معرفی شده، لذا با نام امواج لمب^۵ هم شناخته می‌شوند. امواج لمب اغتشاشات الاستیکی هستند که می‌توانند در یک ورق با مرزهای آزاد منتشر شوند. موج درون ورق، حرکت کرده و سپس بر اساس مقایسه میان سیگنال‌های موج منتشره در ورق سالم (معیار) با ورق تحت بررسی، هرگونه تغییر در سیگنال امواج در شرایط یکسان می‌تواند بیانگر وجود خرابی در سازه باشد. بازرسی غیرمخرب و پایش سلامت سازه‌ای به کمک امواج لمب به دلیل قابلیت انتشار این امواج در فواصل طولانی و حساسیت مناسب به عیوب کوچک سطحی و زیرسطحی و حتی حرکت در مسیرهای غیرمستقیم، مزایای فراوانی نسبت به آزمون‌های غیرمخرب از جمله آزمون فراصوتی معمول دارد [۶]. یکی از روشهای ساده و مقرون به صرفه برای تولید امواج لمب در سازه‌های ورقی، استفاده از مبدل‌های پیزوالکتریک است. این مبدل‌ها با ابعاد کوچک و وزن کم، قابلیت تولید و دریافت امواج لمب را داشته و به خصوص برای سامانه‌های پایش سلامت سازه‌ای در سازه‌های هوافضایی بسیار مناسب هستند [۷]. گائو و کاولی^۶ احتمالاً در گروه اولین محققانی هستند که به بررسی خرابی از نوع تورق در ورق‌های چند لایه کامپوزیتی اقدام کرده‌اند [۸]. کسلر^۷ و همکارانش سه نوع خرابی شامل سوراخ، شکست الیاف و تورق را در یک ورق کامپوزیتی به کمک امواج لمب در سه نمونه مجزا از هم شناسایی نمودند [۹].

سو^۸ و همکارانش از جمله محققانی هستند که با توجه ویژه به مفهوم اثر انگشت دیجیتال خرابی به مبحث تاثیر منحصر به فرد هر خرابی بر روی سیگنال امواج لمب منتشر شده در سازه به کمک روش-

های پیشرفته پردازش سیگنال پرداخته و اقدام به توسعه روش بازشناخت الگویی و تعیین میزان شدت تورق در یک ورق کامپوزیتی نمودند [۱۰]. شناسایی و تشخیص وجود سوراخ به قطر ۱۲ میلیمتر در یک ورق کامپوزیتی با هندسه خاص و با وجود چندین تیغه تقویت کننده روی آن به کمک شبکه‌ای از محرک‌های پیزوالکتریک و حسگرهای متناظر، مبتنی بر ارسال و دریافت امواج لمب از دیگر کارهای جالب‌توجه وانگ^۹ محسوب می‌شود [۱۱]. شناسایی همزمان دو نوع خرابی شامل تورق و شکاف که پشت سر هم و به طور سری در مسیر امواج لمب در یک تیر کامپوزیتی قرار گرفته‌اند از جمله تحقیقات قابل توجه به^{۱۰} و همکارانشان محسوب می‌شود [۱۲]. بن و راتنام^{۱۱} با استفاده از امواج فراصوت هدایت‌شده دو نوع خرابی متداول در ورق‌های کامپوزیتی شامل شکاف و سوراخ را البته در دو ورق کامپوزیتی مجزا از هم تشخیص داده و ضمن مقایسه روش خود با روش‌های معمول به بیان مزیت‌های آن پرداختند [۱۳]. ویتولا^{۱۲} و همکارانش به ایجاد یک سیستم پایش سلامت سازه‌ای با استفاده از چیدمان آرایه‌ای مبدل‌های پیزوالکتریک اقدام نموده‌اند. آنها در تحقیق خود حتی اثرات دمایی را نیز مورد توجه قرار داده‌اند [۱۴].

با وجود تعدد کاوش‌ها در حوزه ارزیابی غیرمخرب سازه‌ها با استفاده امواج لمب، پژوهش در زمینه ایجاد تمایز میان عیوب مختلف و دسته‌بندی خرابی‌ها به خصوص در سازه‌های کامپوزیتی، مبتنی بر پردازش و تحلیل تغییرات سیگنال امواج، موضوعی جالب توجه است که باید تحت مطالعه و تحقیقات بیشتری قرار گیرد.

در این پژوهش با الگوبرداری و توسعه روش‌ها و تجربیات عملی سایر محققان، سه نوع خرابی، روی یک ورق چندلایه کامپوزیتی از جنس اپوکسی/الیاف شیشه در موقعیت‌های مکانی مشابه نسبت به مرزهای آزاد ورق ایجاد گردید. سپس با الصاق مبدل‌های پیزوالکتریک به صورت آرایه‌ای و با نقش دوگانه محرک و حسگر، مسیرهایی در چهار ناحیه شامل نواحی سالم، ناحیه دچار تورق، شکاف و سوراخ برای انتشار امواج در ورق در سه راستای مختلف فراهم گردید. در ادامه، استخراج ویژگی از سیگنال امواج در فضای تبدیل موجک در دستور کار قرار گرفت. سپس سیگنال‌های دریافتی از ناحیه سالم سازه با سیگنال‌های عبوری از سایر نواحی دچار خرابی، مقایسه شده و در نهایت، رفتار انتشاری امواج در حضور هر یک از انواع خرابی‌های موجود در نمونه، با طراحی دو نوع شاخص خرابی به صورت عددی و کمی مورد بررسی و تحلیل واقع شد.

بر این اساس، تجمیع و توجه به مواردی از قبیل تشخیص همزمان سه نوع خرابی مختلف در یک ورق کامپوزیتی، وجود خرابی‌ها در مجاورت هم، عدم نیاز به ساخت نمونه‌های مجزای سالم و معیوب، بکارگیری روش‌های پردازش سیگنال در حوزه تلفیقی زمان و فرکانس، توسعه مفهوم اثر انگشت دیجیتال خرابی، انجام روش بازرسی آنی و نهایتاً مقایسه نتایج تجربی در قالب شاخصهای شفاف عددی را می‌توان به عنوان ویژگی‌های نوآورانه پژوهش حاضر برشمرد.

- 1 Condition based monitoring
- 2 Structural health monitoring
- 3 Ultrasonic guided waves
- 4 Horace Lamb
- 5 Lamb waves
- 6 Guo and Cawley
- 7 Kessler
- 8 Su

9 Wang
10 Ye
11 Ben and Ratnam
12 Vitola

۲- اصول و معادلات انتشار امواج فراصوت ورقی

امواج لمب، در واقع جمع آثار مودهای طولی و برشی است که در یک سازه ورقی شکل می‌گیرد. این امواج بر حسب مودهای انتشار به مود 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. رفتار موج در یک ورق نازک تک لایه به فرم تانسور دکارتی با رابطه (۱) و تحت عنوان معادله لمب-ریلی تعریف می‌گردد:

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,j} + \rho f_i = \rho u_i \quad (1)$$

در رابطه بالا u_i و f_i به ترتیب تغییر مکان و نیرو در جهت x_i (محورهای مختصات) بوده در حالی که ρ و μ به ترتیب چگالی و مدول برشی ورق هستند. در این حال داریم $\lambda = 2\mu\nu / (1 - 2\nu)$ که نماد λ ثابت لامه و ν ضریب پواسون است. رابطه (۱) پس از تجزیه به روش هلمهولتز به صورت رابطه (۲) برای مودهای متقارن و رابطه (۳) برای مودهای نامتقارن بدست خواهد آمد.

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

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \quad (3)$$

که در این روابط داریم:

$$p^2 = (\omega^2 / C_L^2) - k^2 \quad q^2 = (\omega^2 / C_T^2) - k^2 \quad (4)$$

در روابط فوق، ω فرکانس، C_L و C_T به ترتیب سرعت موج طولی و عرضی، k عدد موج و h نصف ضخامت ورق است. این روابط با تغییرات اندکی برای ورق‌های N لایه نیز در قالب رابطه (۵) با سهولت و دقت مناسب قابل استفاده می‌باشد.

$$\mu^n \nabla^2 u^n + (\lambda^n + \mu^n) \nabla(\nabla \cdot u^n) = \rho^n \frac{\partial^2 u^n}{\partial t^2} \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

این در حالی است که اپراتورهای ∇ و ∇^2 مطابق با رابطه (۶) تعریف می‌شوند:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_3} \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \quad (6)$$

روش تجزیه هلمهولتز ابزاری کارآمد برای محاسبه تنش و کرنش در هر لایه از ورق بر اساس روابط فوق‌الذکر است [۱۵و۱۶].

۳- مفاهیم و شرح انجام اقدامات اولیه

۳-۱- تعریف مساله اصلی

طراحی و اجرای کامل یک سامانه پایش سلامت سازه‌ای ذیل مفهوم ارزیابی غیرمخرب مبتنی بر انتشار امواج فراصوت هدایت شده با استفاده از مبدل‌های پیزوالکتریک با هدف تشخیص و تمایز (دسته-بندی) انواع گوناگون خرابی در ورق‌های چندلایه کامپوزیتی پایه پلیمری تقویت شده با الیاف، هدف اصلی این پژوهش است. در سامانه طراحی شده، مطالعه سیگنال امواج منتشره در نواحی مختلف سازه، به کمک روش‌های پردازش سیگنال و تحلیل‌های رایانه‌ای صورت می‌پذیرد. در نهایت، بر اساس مفهوم اثرگذاری یکتای هر خرابی بر سیگنال امواج، ضمن ایجاد ارتباط میان ویژگی‌های سیگنال با نوع خرابی، تشخیص و تمایز خرابی‌ها در سازه‌ی تحت بررسی، امکان‌پذیر خواهد شد. به منظور فراهم شدن مقایسه کمی و عددی نتایج حاصل از

آزمایش، تغییرات ایجاد شده در سیگنال‌ها به دلیل وجود خرابی در سازه، در قالب کمیت‌هایی با نام شاخص خرابی بررسی شده است.

۳-۲- ساخت نمونه آزمایشگاهی

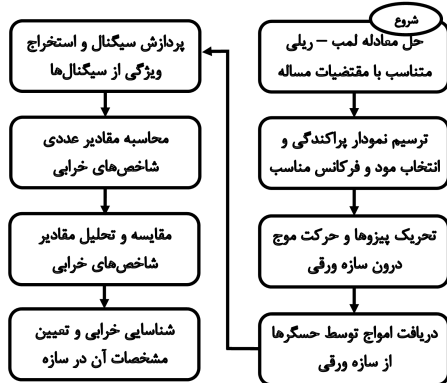
نمونه آزمایشگاهی شامل یک ورق کامپوزیتی از جنس اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه و متشکل از ۸ لایه پارچه بافته شده (در مجموع ۱۶ لایه) با ابعاد مربع ۴۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر به روش تزریق در خلا ساخته شد. لایه‌چینی طراحی شده به صورت $[0/90/\pm 45/\pm 45/0/90]_s$ بوده که کاربردهای صنعتی فراوانی نظیر ساخت بدنه سازه‌های هوافضایی دارد.

۳-۳- ایجاد خرابی‌ها روی نمونه

به منظور ایجاد خرابی‌ها، ورق به چهار ناحیه عبارت از یک ناحیه سالم و سه ناحیه معیوب مشتمل بر سه نوع خرابی متداول در ورق‌های کامپوزیتی شامل تورق، شکاف و سوراخ تقسیم شده و خرابی‌های مذکور در موقعیت مکانی مشابه نسبت به مرزهای بیرونی ورق در نمونه‌ی تحت بررسی ایجاد گردید. بر این اساس، تورق با هندسه مدور و قطر ۵۰ میلی‌متر با تعبیه دو لایه نازک تفلون با توجه به لایه‌چینی متقارن و با هدف انتشار همگن امواج در دو سوی ناحیه معیوب، در وسط ضخامت ورق (ناحیه شماره ۲) تعبیه شد. در ادامه، شکاف با پهنای ۱ میلی‌متر و طول ۴۰ میلی‌متر (ناحیه شماره ۳) و سوراخ به قطر ۸ میلی‌متر (ناحیه شماره ۴) و هر دو راه به در، ایجاد گردید.

۳-۴- فلوجارت حل مساله

حل مسایل مبتنی بر شناسایی عیوب توسط امواج لمب شامل مراحل است که در شکل ۱ برای درک بهتر موضوع به صورت فلوجارت ارائه شده است.



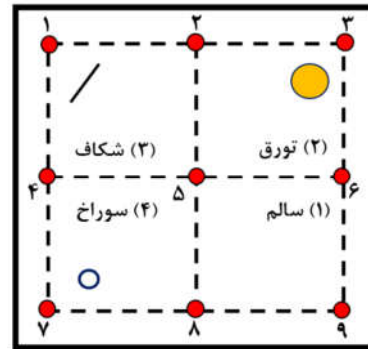
شکل ۱- فلوجارت فرآیند عیب‌یابی در سازه‌ها توسط امواج لمب

۴- طراحی آزمایش

۴-۱- طراحی مسیرهای انتشار امواج

برای انجام آزمایش‌های لازم در پژوهش حاضر، مطابق با شکل ۲ اقدام به نصب و چسباندن ۹ عدد مبدل پیزوالکتریک از جنس PZT-4، قطر ۱۰ و ضخامت ۲ میلی‌متر، ثابت الاستیک $7.3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ، ثابت دی الکتریک $1400 @ 1\text{KHz}$ و چگالی 8 gr/cm^3 با فرکانس مرکزی 200KHz در نواحی چهارگانه‌ی طراحی شده روی ورق شد. گزینش این مبدل،

تابع فرکانس تحریک بوده که در بخش (۵-۳) چگونگی تعیین آن تشریح شده است. در نهایت با تعویض نقش محرک و حسگر به ازای هر مبدل پیزوالکتریک در ۴۰ مسیر مختلف اقدام به انتشار امواج فراصوت هدایت شده در ورق کامپوزیتی گردید. موضوع مهم در این تحقیق، عدم تمایز نمونه سالم از نمونه معیوب می‌باشد که ذیل مفهوم بازرسی آنی بوده و در مرجع [۱۶] به آن پرداخته شده است.

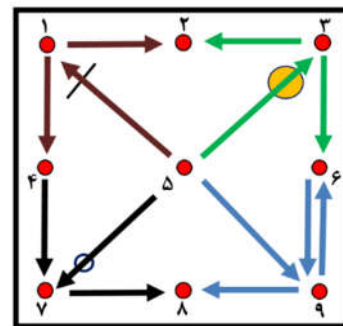


شکل ۲- طرحواره نمونه تحت آزمایش و مسیرهای انتشار امواج

در این روش به جای استفاده از یک نمونه سالم به عنوان مرجع و سپس مقایسه جداگانه سازه‌ی تحت بازرسی با آن، ضمن ایجاد مسیرهای مختلف انتشار امواج در چندین راستا و جهت مختلف روی فقط یک سازه‌ی واحد و مقایسه سیگنال امواج مرتبط با هر یک از آن مسیرها با یکدیگر، وضعیت سلامت سازه بررسی می‌شود.

۴-۲- طراحی وضعیت‌های مقایسه‌ای

بر اساس شکل ۳ و با هدف تمرکز بیشتر و مطالعه دقیق‌تر بر روی فرآیند شناسایی خرابی، ضمن بررسی تمام مسیرهای ۴۰ گانه و انجام مقایسه‌های لازم، در نهایت ۹ وضعیت مقایسه‌ای انتخاب گردید. انتخاب مسیرها بر اساس تامین اهدافی از قبیل نسبت عددی مطلوب سیگنال به نویز و بررسی شبیه‌ترین مسیر در ناحیه سالم با مسیرهای عبوری از روی خرابی یا از مجاورت آن، صورت پذیرفت.



شکل ۳- وضعیت‌های مقایسه‌ای انتشار امواج در ورق کامپوزیتی

در مقایسه بین سیگنال مسیرهای سالم و معیوب دو نکته مدنظر قرار گرفت. اول با توجه به اینکه ورق کامپوزیتی دارای چیدمان لایه‌ای در سه راستای مختلف ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه است، مسیرهای انتخابی نیز در راستاهای مختلف مذکور انتخاب گردید. دوم آنکه مسیرهای انتخابی به گونه‌ای تعیین شد تا هر دو حالت عبور موج از روی خرابی و همچنین عبور موج از مجاورت خرابی بررسی گردد. مطابق جدول ۱ حرف A

نشانگر محرک و حرف S نشان‌دهنده حسگر است. به عنوان مثال، مسیر A5-S9 نمایانگر انتشار امواج از محرک ۵ به حسگر ۹ می‌باشد.

جدول ۱- مسیرهای مقایسه‌ای انتشار امواج در ورق کامپوزیتی					
وضعیت	مسیر سالم	ناحیه سالم	مسیر معیوب	ناحیه معیوب	هدف
۲	A9-S8	۱	A3-S2	۲	شناسایی
۳	A9-S6		A3-S6		تورق
۴	A5-S9		A5-S1		شناسایی
۵	A9-S8	۱	A1-S2	۳	شناسایی شکاف
۶	A9-S6		A1-S4		شناسایی
۷	A5-S9		A5-S7		شناسایی
۸	A9-S8	۱	A7-S8	۴	شناسایی سوراخ
۹	A6-S9		A4-S7		سوراخ

۴-۳- پیکربندی سامانه

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، برای ایجاد پالس مناسب جهت تحریک مبدل‌های پیزوالکتریک در این آزمایش از یک دستگاه مولد موج از نوع RIGOL DG 1022 و همچنین برای دریافت و ذخیره‌سازی سیگنال‌های دریافتی از هر حسگر پیزوالکتریک، از یک دستگاه اسیلوسکوپ دیجیتال با پهنای باند ۴۰ مگاهرتز، نرخ نمونه برداری یک گیگاسمپل بر ثانیه، مجهز به چهار کانال همزمان و از نوع GW-INSTEK GDS-1054B استفاده گردید.



شکل ۴- پیکربندی سامانه پایش سلامت سازه‌ای اجرا شده

۴-۴- تولید نرم افزار کنترل تجهیزات

تنظیم صحیح پارامترها و ورودی‌های تجهیزات آزمایشگاهی متناسب با مقتضیات و شرایط طراحی شده برای هر آزمایش نظیر فرکانس تحریک، دامنه پالس تحریک، شکل موج و نوع تحریک بسیار ضروری بوده و مقداردهی هر یک از این پارامترها مستقیماً از طریق امکانات تعبیه شده روی تجهیزات (بالاخص در مورد آزمایش‌های پیچیده)، طولانی و بعضاً دشوار است. موضوع مهم دیگر، ضرورت امکان تکرار چندین مرتبه آزمایش و استخراج داده‌ها به دفعات مکرر و میانگین‌گیری برای دسترسی به بهترین نتایج ممکن است. مطابق شکل ۵ برای انجام سریع‌تر و دقیق‌تر آزمایشات و رسیدن به راه‌حل مناسب، نرم‌افزاری در محیط LabVIEW طراحی و تولید گردید.

طراحی نرم‌افزار به گونه‌ای است که کاربری عمومی داشته و استفاده از آن، علاوه بر تحقیق فعلی، در پژوهش‌های مبتنی بر پایش

استخراج ویژگی‌های سیگنال امواج لمب مترتب بر محدوده دقیق فرکانس تحریک استفاده شده است.

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (7)$$

در این رابطه $CWT(a, b)$ ضرایب موجک بوده و نمادهای a و b به ترتیب پارامتر مقیاس و انتقال هستند. $f(t)$ نشانگر تابع سیگنال دلخواه تحت بررسی و Ψ^* بخش مختلط تابع Ψ بوده که اصلاً تابع هسته یا تابع موجک مادر نامیده می‌شود. در این تحقیق، بنا بر مقتضیات مساله و به دلیل تفکیک پذیری بالا و دریافت پاسخ مناسب، از تابع مادر با نام گابور استفاده شده که در رابطه (۸) صدق می‌کند.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (8)$$

در رابطه فوق ω فرکانس زاویه‌ای بوده و از طرفی تابع گابور بر اساس رابطه (۹) تعریف می‌گردد:

$$\Psi_G(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{\omega_0}{\gamma}} \exp\left[-\frac{(\omega_0/\gamma)}{2} t^2\right] \exp(i\omega_0 t) \quad (9)$$

به علاوه، انرژی کلی سیگنال، متناسب با ضرایب موجک و از طریق رابطه (۱۰) قابل حصول است [۱۷]:

$$E = C \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |CWT(a, b)|^2 \frac{da db}{a^2} \quad (10)$$

در این پژوهش به منظور مقایسه دقیق و عددی سیگنال‌ها، نسبت به طراحی دو شاخص خرابی مطابق جدول ۲ و با استفاده از مفاهیمی که از طریق روابط فوق قابل تعریف هستند، اقدام گردید.

جدول ۲- مشخصات شاخص‌های خرابی طراحی شده

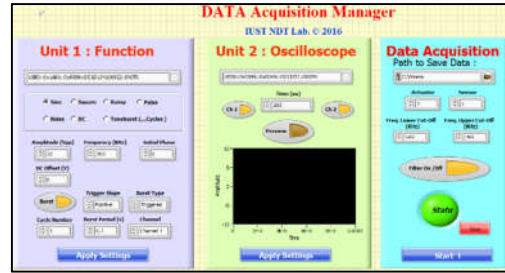
شناسه شاخص	کمیت	ماهیت	نحوه استخراج
DI 1	میزان انحراف	انحراف طیف ضرایب	انحراف جذر میانگین مربعات
	انحراف	موجک در حالت معیوب نسبت به سالم	
DI 2	نسبت تغییرات	نسبت تغییرات بیشینه	حداکثر ضریب موجک مولفه اول سیگنال امواج
	تغییرات	ضرایب موجک در حالت معیوب به سالم	

شاخص خرابی اول (DI1)، با هدف مقایسه طیف داده‌های گسسته در سراسر زمان داده‌برداری بر اساس انحراف جذر میانگین مربعات ضرایب موجک و مطابق با رابطه (۱۱) تعریف می‌شود [۱۸]:

$$DI 1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N Y_i^2}} \quad (i=1, 2, 3, \dots, N) \quad (11)$$

در رابطه (۱۱) نماد N تعداد نقاط داده‌برداری و نمادهای X و Y به ترتیب مربوط به سیگنال‌های مرتبط با نواحی معیوب و سالم است. در حالی که شاخص دوم بر اساس نسبت عددی بیشینه مقدار ضرایب موجک [۶] متناظر با فرکانس تحریک در هر دو حالت گذر موج از

سلامت بر اساس امواج لمب و مبدل‌های پیزوالکتریک با نمونه‌های آزمایشی و پیکربندی‌های متفاوت، همچنان امکان پذیر خواهد بود.

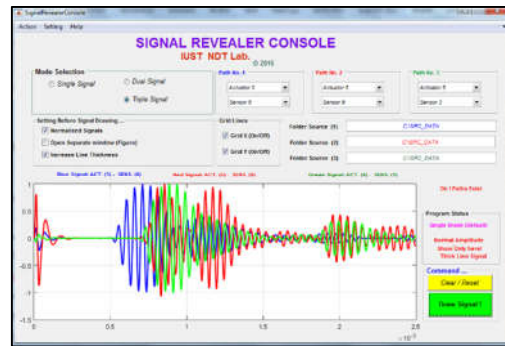


شکل ۵- نرم افزار تولید شده برای کنترل تجهیزات آزمایش

۴-۵- تولید نرم‌افزار مشاهده و مقایسه سیگنال‌ها

چنانچه از تعداد زیادی محرک و حسگر در یک سامانه پایش سلامت سازه‌ای استفاده شده باشد، انتقال تمامی داده‌های مرتبط با سیگنال‌های ذخیره شده به نرم افزارهای محاسبات عددی و رسم نمودار، فرآیندی طولانی بوده و حتی ممکن است با خطا همراه باشد. نکته مهم بعدی، لزوم امکان ترسیم و مشاهده دو یا چند سیگنال به طور همزمان بر روی یک صفحه نمایش با هدف مقایسه سیگنال‌ها و در مرحله بعد استخراج نتایج تحلیلی از آزمایش است.

با توجه به تعداد زیاد محرک‌ها و حسگرها و در نتیجه تعداد مسیرهای انتشار امواج در پژوهش حاضر (۴۰ مسیر) و همچنین احتمال افزایش مسیرها در تحقیقات آینده، یک نرم‌افزار در محیط MATLAB برای مشاهده و مقایسه سیگنال‌های خروجی در هر مسیر، با رابط گرافیکی کامل، کدنویسی و تولید گردید. شکل ۶ تصویری از نرم‌افزار تولید شده را نشان می‌دهد.



شکل ۶- نرم افزار تولید شده برای مشاهده و مقایسه سیگنال‌ها

۴-۶- طراحی شاخص‌های خرابی

فرآیند پردازش سیگنال عمدتاً در سه حوزه زمان، فرکانس و حوزه تلفیقی زمان و فرکانس قابل اجرا است.

بررسی، تحلیل و استخراج ویژگی در حوزه مشترک زمان و فرکانس نسبت به دو حوزه دیگر، دارای مزیت‌های قابل توجهی است. تبدیل موجک یکی از ابزارهای کارآمد برای پردازش سیگنال در حوزه مذکور بوده که برتری‌های قابل توجهی نسبت به سایر روش‌ها از جمله دقت و شفافیت توأمان زمانی و فرکانسی دارد.

در تحقیق حاضر از تبدیل موجک پیوسته مطابق با رابطه (۷) برای

نواحی معیوب و سالم بدست آمده ($DI2=CWT_D/CWT_I$)، که اندیس D مربوط به حالت معیوب، I مرتبط با وضعیت سالم بوده و تعیین مقادیر ضرایب موجب برای هر سیگنال دلخواه، از رابطه (۷) محاسبه می‌گردد.

۵- تنظیم پارامترها و اجرای آزمایش

۵-۱- استخراج خواص مکانیکی ورق

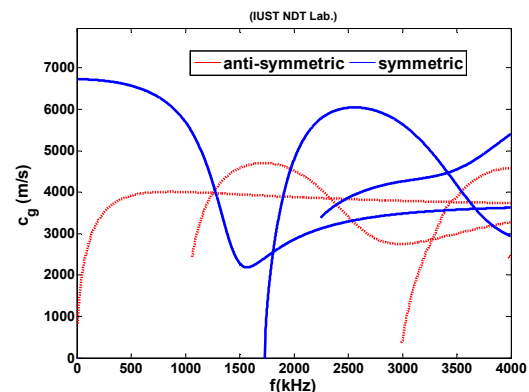
برای ترسیم نمودار پراکندگی، خواص مکانیکی ورق در سه راستای صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه، متناظر با جهات قرارگیری الیاف با استفاده از آزمون کشش و با نصب کرنش‌سنج‌های مناسب برای مواد کامپوزیتی بر روی ۶ نمونه میله‌ای تخت مطابق استاندارد مربوطه [۱۹] استخراج گردید. بر اساس نتایج حاصل از این آزمون، میزان غیرهمسانگردی ورق کامپوزیتی ساخته شده، نسبت به سه جهت قرارگیری الیاف حدود ۳۰ درصد تخمین زده شد. با روشی شبیه به آنچه در مرجع [۲۰] بیان گردیده، ضمن محاسبه میانگین خواص در سه راستای مذکور خواص مکانیکی ورق کامپوزیتی، در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- خواص مکانیکی ورق حاصل از آزمون کشش

خواص مکانیکی	مقادیر عددی
چگالی (Kg/m^3)	۱۷۰۰
مدول یانگ (GPa)	۷۰
ضریب پواسون	۰/۳

۵-۲- حل معادلات و ترسیم نمودار پراکندگی

با استفاده از کد نرم‌افزاری از پیش تولید شده در نرم‌افزار MATLAB اقدام به ترسیم منحنی‌های پراکندگی بر اساس خواص مکانیکی مندرج در جدول ۳ گردید. در شکل ۷ نمودار پراکندگی سرعت گروه امواج منتشره در ورق تحت آزمایش قابل مشاهده است.



شکل ۷- نمودار پراکندگی امواج لمب مرتبط با سرعت گروه

۵-۳- انتخاب فرکانس و مود مناسب بازرسی

برای شناسایی خرابی در سازه‌ها به کمک امواج فراصوت هدایت شده، یکی از اولین و مهمترین گام‌ها، انتخاب مود و فرکانس تحریک مناسب برای ایجاد و انتشار امواج در سازه است. در کاربردهای ارزیابی غیرمخرب، معمولاً فرکانس تحریک به نحوی انتخاب می‌شود تا فقط مودهای پایه، تولید شده که به این ترتیب موجب کاهش پیچیدگی پردازش و تحلیل سیگنال‌ها و عدم تداخل مودهای مختلف گردد. بر

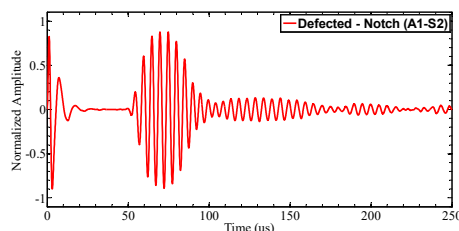
اساس حل معادلات امواج فراصوت هدایت شده برای ورق با مشخصات و خواص مکانیکی مذکور در جدول ۳، مطابق نمودارهای پراکندگی، در محدوده فرکانسی ۲۰۰ کیلوهرتز، تنها دو مود پایه متقارن و نامتقارن تولید شده و سایر مودها در این محدوده فرکانسی ایجاد نمی‌گردند. باید توجه داشت در کاربردهای امواج لمب در حوزه ارزیابی غیرمخرب و شناسایی خرابی در سازه‌های مختلف، لازم است فرکانس تحریک به نحوی انتخاب گردد تا ضمن آنکه نصف طول موج از اندازه خرابی کوچکتر باشد، فرکانس قطع در محدوده‌ای قرار گیرد تا تعداد حداقلی (فقط مودهای پایه) از مودهای ممکن ایجاد گردد [۲۱]. چنانچه بنا بر ضرورتی محدوده فرکانسی به گونه‌ای باشد که بیش از دو مود پایه ایجاد شود، اغلب به دلیل تداخل و اثرات متقابل مودهای مختلف و پیچیده شدن پردازش سیگنال‌ها، فرآیند شناسایی خرابی با دشواری مواجه می‌گردد، مگر آنکه از برخی روش‌های جبرانی و تکمیلی دیگر برای رفع پیچیدگی مساله استفاده گردد.

۵-۴- انتخاب پالس تحریک

در زمان تولید امواج لمب، انتخاب مقادیر مناسب برای پارامترهای پالس تحریک از قبیل پهنای باند، تعداد سیکل‌ها، فرکانس و ولتاژ برای کاهش خاصیت پراکندگی امواج لمب، اهمیت بسزایی دارد. به طور کلی استفاده از یک پالس تحریک با پهنای باند کوچک و تعداد سیکل مشخص، می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه پراکندگی گردد [۲۲]. در این تحقیق، برای ایجاد پالس تحریک، از تک‌پالس تون‌پرست^۱ با فرکانس ۲۰۰ کیلوهرتز و دامنه ۲۰ ولت (نقطه به نقطه) استفاده شد که بیشترین مقدار دامنه را برای سیگنال‌های خروجی بر روی صفحه اسیلوسکوپ ثبت نموده و موجب ایجاد تمرکز انرژی و عدم به هم ریختگی شکل موج خروجی گردید. ضمناً شکل موج سینوسی به دلیل دوره‌ای بودن، تغییرات ملایم و رسیدن به حداکثر مقدار دامنه در یک بازه زمانی کوتاه، انتخابی مناسب برای پالس تحریک بود.

۵-۶- استخراج نتایج

شکل ۸ یک نمونه از سیگنال‌ها، مربوط به مسیر A1-S2 در ناحیه دچار شکاف را نشان می‌دهد. سیگنال‌های مرتبط با تمامی نواحی، مشتمل بر مسیرهای تعیین شده به کمک روش‌های تشریح شده پس از ثبت و نویززدایی، برای پردازش در مراحل بعدی ذخیره گردید.

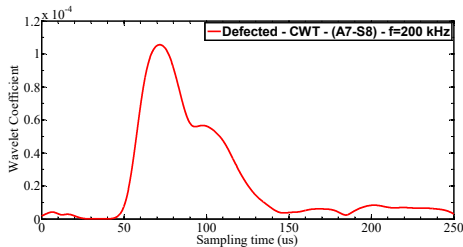


شکل ۸- یک سیگنال منتشر شده در ناحیه شکاف

در برخی مواقع، پردازش سیگنال‌ها در حوزه زمان به خودی خود ارزشمند بوده و اطلاعات مهمی از سازه تحت بررسی در اختیار محققان

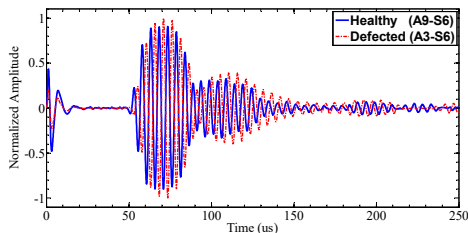
¹ Tone Burst

محدوده خط فرکانس اصلی تحریک (۲۰۰ کیلوهرتز) است. در حالی که شکل ۱۰ تصویری از وضعیت سیگنال تحت بررسی، در فضای تبدیل موجک را نشان می‌دهد، باید توجه داشت این فضا در شکل مذکور، مرتب بر کلیه فرکانس‌های موجود در باند فرکانسی پالس تحریک است. به عبارت دیگر در این حالت ضرایب موجک استخراج شده، متشکل از یک ماتریس دو بعدی است که هر درایه از آن ماتریس، شامل یک ضریب موجک و از طرفی متناظر با یک زوج عددی زمان و فرکانس است. نکته مهم آن است که برای مقایسه دقیق دو سیگنال مربوط به دو مسیر و دو ناحیه مختلف (مسیرهای ناحیه سالم با معیوب) ضروری است بخشی از باند فرکانسی که منطبق با فرکانس پالس تحریک باشد، استخراج شده و ضرایب موجک مربوط به آن، برای هر دو سیگنال دلخواه مقایسه گردد. شکل ۱۱، نمودار مقادیر مربوط به ضرایب موجک، حاصل از اعمال تبدیل روی همان سیگنال A7-S8 را در حالی که فقط ضرایب مرتبط با فرکانس تحریک (معادل ۲۰۰ کیلوهرتز) از آن استخراج شده‌اند، نشان می‌دهد. همانطور که در بخش ۴-۶ ذکر شد، این ضرایب متناسب با انرژی امواج بوده و امکان مقایسه ویژگی‌های هر دو سیگنال دلخواه بر اساس این ضرایب وجود دارد.



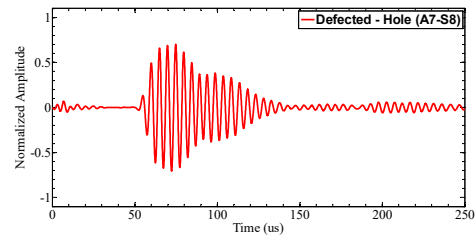
شکل ۱۱- استخراج ضرایب موجک محدود به فرکانس تحریک

مقایسه سیگنال‌های نواحی معیوب با سیگنال‌های ناحیه سالم به منظور آشکار سازی علائم اثر خرابی بر روی امواج منتشر شده در سازه با هدف شناسایی چندین نوع خرابی از اهداف اصلی این پژوهش است. در این مرحله با توجه به تمایز نحوه اثرپذیری امواج از هر نوع خرابی، شیوه‌ای هدفمند (طراحی شاخص‌های خرابی) برای شناسایی عیوب از یکدیگر بر اساس آثار آنها بر سیگنال امواج ارائه شده است. لذا مقایسه سیگنال‌ها گامی اساسی در مراحل مختلف انجام این پژوهش است. همانطور که در بخش ۴-۲ ذکر شد، در این تحقیق، بررسی تغییرات سیگنال‌ها به گونه‌ای روشمند و بر اساس طراحی ۹ وضعیت مقایسه‌ای صورت گرفته‌است. شکل ۱۲ یک نمونه از نحوه مقایسه دو سیگنال مرتبط با ناحیه دچار تورق و ناحیه سالم، مشتمل بر وضعیت شماره ۳ را در حوزه زمان نشان می‌دهد.



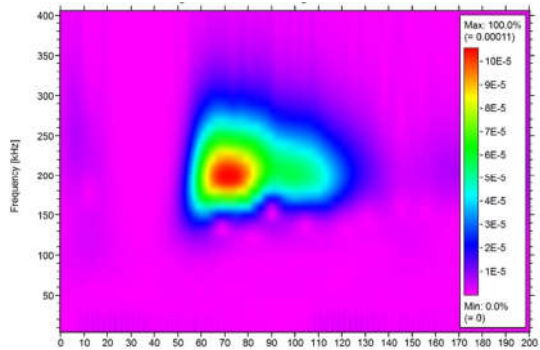
شکل ۱۲- مقایسه سیگنال مربوط به ناحیه تورق با ناحیه سالم

قرار می‌دهد. لیکن در بسیاری از موارد، داده‌های بدست آمده در حوزه زمان عملاً حاوی اطلاعات چندان واضحی نبوده و محتوای با ارزش سیگنال، اصطلاحاً در آن پنهان است. لذا ضروری است، سیگنال تحت بررسی از حوزه زمان به سایر حوزه‌ها نظیر حوزه فرکانس یا حوزه مشترک زمان و فرکانس انتقال یابد. علاوه بر آن، در پردازش سیگنال امواج لمب در حوزه زمان با افزایش تعداد و همپوشانی مودها و مولفه‌ها کار تفسیر سیگنال در حوزه زمان دشوار خواهد شد. تبدیل موجک یکی از ابزارهای بسیار پرفایده برای نگاشت داده‌ها از حوزه زمان به حوزه مشترک زمان و فرکانس است که موجب شفافیت زمانی و فرکانسی برای داده‌های حاصل از ثبت یک سیگنال می‌گردد. شکل ۹ یک نمونه از سیگنال‌های دریافتی را که مربوط به مسیر A7-S8 مرتبط با ناحیه آسیب دیده و دچار خرابی از نوع سوراخ است نشان می‌دهد.



شکل ۹- یک سیگنال مربوط به ناحیه سوراخ در حوزه زمان

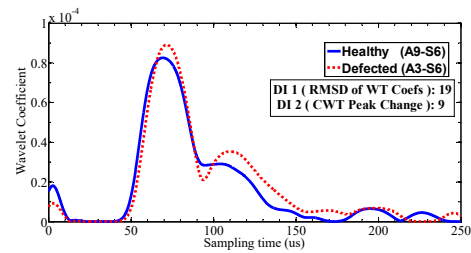
سیگنال مذکور پس از اعمال تابع موجک گابور به حوزه مشترک زمان و فرکانس، نگاشت شده که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. محور افقی نشان دهنده زمان داده‌برداری بر حسب میکروثانیه و محور عمودی نشان دهنده محدوده فرکانسی بر حسب کیلوهرتز است. تصویر ارائه شده به صورت طیف رنگی متناسب با بزرگی ضرایب موجک بوده که نقاط قرمز در نسخه رنگی و دایره توپر تیره در نسخه سیاه و سفید، نشان‌دهنده حداکثر مقدار ضرایب موجک است. نزدیکی و حتی تداخل مشاهده شده در خصوص دو مولفه موج در تصویر مذکور با وضوح بیشتری نسبت به شکل ۹ قابل بررسی است که می‌تواند به دلیل برخورد مولفه اصلی موج با مولفه دوم با ماهیت بازتابی باشد. استفاده از تبدیل موجک ابزاری کارآمد است که در چنین مواقعی موجب شفافیت و تمایز بسیار بهتر مولفه‌های یک موج تحت بررسی خواهد بود.



شکل ۱۰- اعمال تبدیل موجک گابور روی سیگنال شکل ۹

همانطور که مشاهده می‌شود، مطابق پیش‌بینی، بیشترین مقدار عددی ضرایب موجک (نواحی مرکزی پر رنگ و متراکم) مربوط به

در شکل ۱۳ همین مقایسه در فضای تبدیل موجک، متناظر با باند فرکانسی پالس تحریک و با شفافیت توأمان زمانی و فرکانسی، نمایش داده شده که دارای وضوح و امکان مشاهده‌ی بهتر است.



شکل ۱۳- مقایسه سیگنال‌های شکل ۱۳ در فضای تبدیل موجک

با مقایسه میان سیگنال امواج مربوط به مسیرهای A9-S6 و A3-S6، مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده گردید، سیگنال مربوط به مسیر شامل تورق، در تمامی مولفه‌ها دچار افزایش دامنه شده است. هر چند وجود تورق در ورق کامپوزیتی باعث تغییرات متنوع و مختلفی بر روی دامنه سیگنال امواج لمب شده که ممکن است گاه به افزایش دامنه [۲۳] و در برخی مواقع به کاهش دامنه [۲۴] یا حتی ایجاد مود جدید [۲۵] منجر شود، لیکن در این آزمایش، افزایش دامنه سیگنال موج لمب را می‌توان به پدیده برخورد موج به خرابی و همچنین انعکاس موج از ناحیه دچار تورق، مرتبط دانست.

۷- محاسبه شاخص‌های خرابی به تفکیک هر ناحیه

شاخص خرابی بر اساس مباحث مذکور در بخش ۴-۶ برای ۹ وضعیت مقایسه‌ای مندرج در بخش ۴-۲ بر اساس سیگنال‌های استخراجی در حوزه تلفیقی زمان و فرکانس با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار متلب به صورت همزمان با ترسیم شکل سیگنال امواج، محاسبه شد که در جدول ۴ مشاهده می‌گردد. به منظور هم رتبه نمودن مقادیر عددی شاخص‌ها و سهولت در مقایسه، کلیه اعداد مذکور در محدوده ارقام صفر تا ۱۰۰ ارائه گردید.

جدول ۴- شاخص‌های خرابی و مقادیر محاسبه شده

مسیره‌های مقایسه‌ای	نوع خرابی	راستا (درجه)	شاخص شماره ۱	شاخص شماره ۲
۱ A5-S9, A5-S3		۴۵	۸۷	۷۹
۲ A9-S8, A3-S2	تورق	صفر	۵۳	۳۰
۳ A9-S6, A3-S6		۹۰	۱۹	۹
۴ A5-S9, A5-S1		۴۵	۴۸	-۴۷
۵ A9-S8, A1-S2	شکاف	صفر	۴۶	-۲۲
۶ A9-S6, A1-S4		۹۰	۴۳	-۳۴
۷ A5-S9, A5-S7		۴۵	۷۵	۴۸
۸ A9-S8, A7-S8	سوراخ	صفر	۵۰	۲۵
۹ A6-S9, A4-S7		۹۰	۵۶	۲۴

۸- بحث و تحلیل

شاخص خرابی شماره ۱ مبتنی بر انحراف جذر میانگین مربعات برای تعیین میزان اختلاف بین طیف ضرایب موجک، مرتبط با مقایسه سیگنال مسیرهای نواحی سالم و معیوب در کل زمان داده‌برداری است. بر این اساس هر چه مقدار این شاخص بزرگتر باشد، اختلاف میان

سیگنال نواحی سالم و معیوب بیشتر بوده و نشانه وجود خرابی با مشخصاتی بارز در سازه است. مطابق شکل ۱۴ که مقادیر شاخص خرابی شماره ۱ را در وضعیت‌های مقایسه‌ای مختلف نشان می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت، در پیکربندی تحت آزمایش، تورق بیش از سایر عیوب، طیف ضرایب موجک مربوط به سیگنال امواج، در سازه ورقی کامپوزیتی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. شدت تاثیر خرابی از نوع سوراخ بر روی سیگنال‌ها، در رتبه دوم قرار داشته و نهایتاً شکاف کمترین اثر را بر روی امواج منتشره در ورق کامپوزیتی در این تحقیق دارد.



شکل ۱۴- تغییرات شاخص خرابی شماره ۱ در وضعیت‌های ۹ گانه

با این حال تاثیرگذاری شکاف در قالب شاخص مذکور، در وضعیت‌های در نظر گرفته شده، شامل جهات مختلف انتشار امواج، تقریباً وضعیتی مشابه و نزدیک به هم داشته لیکن تغییرات شاخص شماره ۱ مرتبط با تاثیر تورق بر امواج، در وضعیت‌های مختلف، دستخوش نوسانات آشکارتری نسبت به دیگر خرابی‌ها است. نکته قابل توجه در این تحلیل، تاثیرپذیری حداکثری امواج از خرابی، در موقعیتی است که موج در مسیری منطبق با خط مستقیم واصل محرک، خرابی و حسگر انتشار می‌یابد. این واقعیت به خصوص درباره خرابی از نوع تورق و سوراخ بیشتر مشهود است. شاخص خرابی شماره ۱، هر چند اطلاعات مفیدی از اختلاف و تمایز میان سیگنال عبوری از نواحی سالم و معیوب را نشان می‌دهد، لیکن بر اساس آن مشخص نیست، این تغییرات چه ماهیتی دارد. به عنوان مثال به کمک این شاخص، کاهش یا افزایش بودن اختلافات (جهت تغییرات) مشخص نمی‌باشد. بنابراین برای تکمیل فرآیند بررسی تغییرات در سیگنال عبوری از نواحی معیوب نسبت به ناحیه سالم، از شاخص شماره ۲ استفاده گردید. شکل ۱۵ تغییرات شاخص خرابی شماره ۲ را در وضعیت‌های مقایسه‌ای طراحی شده نشان می‌دهد. شاخص خرابی شماره ۲، ضمن داشتن تطابق مناسب با اطلاعات حاصل از شاخص خرابی شماره ۱، نتایج دقیق‌تری نسبت به آن ارائه می‌نماید که در تشخیص نوع خرابی، آثار و جهت تاثیرات (افزایشی یا کاهش)، اطلاعات مهمی را در اختیار قرار می‌دهد. بر اساس شاخص مذکور، در پیکربندی استفاده شده برای آزمایش در این تحقیق، اثر خرابی‌های تورق و سوراخ بر روی امواج، ماهیتی مشابه و افزایشی (نمایش داده شده با اعداد مثبت) داشته در حالی که مقدار این شاخص برای شکاف از نوع کاهش (نمایش داده شده با اعداد منفی) و متفاوت با دو نوع خرابی اول است. این واقعیت در برخی منابع نیز نظیر مرجع [۶] با ادبیاتی متمایز مورد اشاره قرار گرفته است. موضوع دیگر در خصوص تمایز و تفاوت شاخص‌های شماره ۱ و ۲ به بازه زمانی داده‌برداری معطوف است. چنانکه داده‌های مربوط به محاسبه شاخص اول مرتبط به کل زمان داده‌برداری و شاخص دوم

وضعیت بررسی شده نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۶ ملاحظه می‌شود رفتار کلی و تغییرات هر دو شاخص تطابق نسبی دارند. هر چند باید توجه داشت بر اساس تحلیل‌های ارائه شده قبلی، هر شاخص، نماد چگونگی تاثیرپذیری امواج از خرابی‌ها با مفهوم خاص خود و متاثر از روابط محاسباتی و ریاضی مختص به هر یک از آن شاخص‌ها است. بار دیگر بر این مفهوم مهم تاکید می‌شود که هر نوع خرابی (در هر نوع پیکربندی، وابسته به چیدمان ورق کامپوزیتی و آرایش مبدل‌های منتشر کننده و دریافت کننده امواج) تاثیرگذاری منحصر به فردی روی امواج داشته که بسان اثر انگشت افراد، می‌تواند عامل شناسایی و تعیین هویت آن نوع از خرابی باشد [۲۶]. شاخص‌های تعریف شده در این مقاله به عنوان معیار عددی برای نمایش این عامل شناسایی، مرتبط با وضعیت‌های مقایسه‌ای گوناگون، محاسبه و ارائه گردیده است.

مقدار عددی و علامت جبری (جهت تغییرات) یک شاخص، ممکن است برای یک خرابی در مقایسه با خرابی دیگر، کاملاً متفاوت بوده و البته همین موضوع، وجه تمایز و عامل مهم شناسایی انواع خرابی‌ها در یک سازه‌ی تحت بازرسی محسوب می‌گردد.

۹- جمع بندی و نتیجه گیری

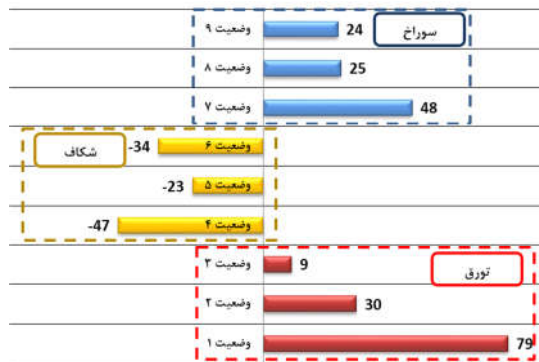
در این پژوهش یک ورق کامپوزیتی پایه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه مشتمل بر ۸ لایه بافته‌ی شده (۱۶ لایه) و دچار سه نوع خرابی متداول شامل تورق، شکاف و سوراخ با استفاده از یک سامانه پایش سلامت سازه‌ای به کمک امواج فراصوت هدایت شده و مبدل‌های پیزوالکتریک، مورد ارزیابی غیرمخرب قرار گرفت. امواج در جهت مختلف و منطق بر راستای قرارگیری الیاف در سازه، منتشر شده و با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال و مفاهیم تبدیل موجک، تغییرات به وجود آمده در سیگنال امواج، به دلیل وجود خرابی‌ها، بررسی و نشان داده شد که هر خرابی بر اساس مشخصات آن (از جمله نوع خرابی) و همچنین با توجه به راستای برخورد امواج، تغییری منحصر به فرد در سیگنال امواج منتشره ایجاد می‌نماید.

به منظور ارائه نتایج کمی و عددی دو شاخص خرابی، به کمک خروجی‌های تبدیل موجک، طراحی و بر اساس ویژگی‌های استخراج شده از هر سیگنال محاسبه و ارائه گردید. مقادیر متفاوت شاخص‌های خرابی به ازای هر یک از وضعیت‌های مقایسه‌ای ۹ گانه که در این تحقیق در نظر گرفته شده است، نشانه‌ای برای اعلام وجود خرابی در سازه و در مرحله بعد، شناسایی و تمایز آن از سایر خرابی‌هایی است که در سازه تحت بررسی وجود دارند.

مهمترین نتایج بدست آمده از این پژوهش، عبارتند از:

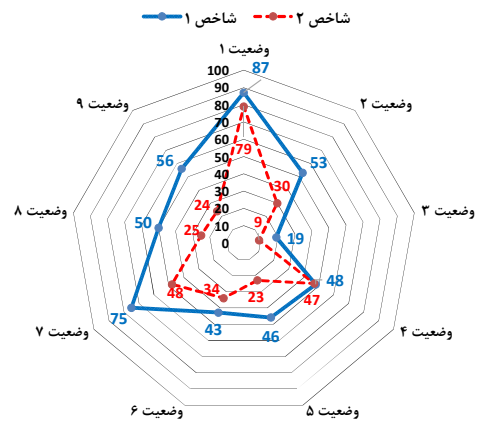
- روش تجربی و تحلیلی ارائه شده با توجه به قابلیت‌های امواج فراصوت هدایت شده، موجب می‌گردد نیاز به بازرسی موضعی و پیمایش نقطه به نقطه سازه، نظیر آنچه در آزمون‌های فراصوتی معمول انجام می‌شود، رفع شده و ضمن افزایش سرعت بازرسی، هزینه‌های فرآیند تشخیص خرابی به خصوص برای سازه‌های ورقی کامپوزیتی بزرگ به مراتب کاهش یابد.
- با طراحی مسیرهای متنوع انتشار موج ذیل مفهوم بازرسی آبی، احتیاج به ساخت نمونه‌های متعدد و مجزای آزمایشگاهی برای مقایسه نمونه‌های معیوب با نمونه سالم (معیار) مرتفع شده که

فقط مربوط به مولفه اول موج و صرفاً یک لحظه خاص یعنی زمان به قله رسیدن دامنه^۱ و حداکثر ضریب موجک متناظر با آن است. باید در نظر داشت، دخالت دادن سایر مولفه‌های امواج (غیر از مولفه اصلی) در تخمین تغییرات انرژی، در واقع موجب اثرپذیری محاسبات از کلیه مولفه‌های امواج منتشره در سازه می‌گردد. از آنجا که غیر از مولفه اصلی، سایر مولفه‌ها در این آزمایش ماهیتی بازتابی، ناشی از برخورد موج به لبه‌های ورق دارند، میزان تاثیر خرابی بر این مولفه‌های بازتابی بر حسب نوع خرابی متفاوت است. لذا ایجاد شفافیت و اصطلاحاً خلوص بیشتر در تحلیل ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال‌های تحت بررسی، به منظور کاهش اثرات بازتابی لبه‌های ورق، دلیل دیگری برای طراحی و محاسبه شاخص خرابی شماره ۲ می‌باشد.



شکل ۱۵- تغییرات شاخص خرابی ۲ در در وضعیت‌های ۹ گانه

در شکل ۱۶ می‌توان میزان تغییرات هر دو شاخص شماره ۲ و ۱ را نسبت به یکدیگر به صورت یکجا در سه راستای مختلف، منطبق بر جهت قرارگیری الیاف تقویت کننده و همچنین مرتبط با وضعیت‌های ۹ گانه در نظر گرفته شده، ملاحظه و مقایسه نمود.



شکل ۱۶- مقایسه و پراکندگی مقداری شاخص‌ها

با در نظر گرفتن قدرمطلق شاخص‌ها، حلقه بیرونی، تغییرات شاخص شماره ۱ و حلقه درونی، تغییرات شاخص شماره ۲ را در هر ۹

^۱ Time Of Flight (TOF)

monitoring, John Wiley & Sons, 2010.

- [6] Su Z., Ye L., Identification of damage using Lamb waves: from fundamentals to applications, Springer Science & Business Media, 2009.
- [7] Yu H., Dynamic behaviour of piezoelectric sensors and their application in crack identification for SHM, University of Alberta, 2017.
- [8] Guo N., Cawley P., The interaction of Lamb waves with delaminations in composite laminates, The Journal of the Acoustical Society of America, 94(4) 2240-2246, 1993.
- [9] Kessler S.S., Spearing S.M. and Soutis C., Damage detection in composite materials using Lamb wave methods, Smart materials and structures, 11(2) 269, 2002.
- [10] Su Z., Ye L., Lamb wave-based quantitative identification of delamination in CF/EP composite structures using artificial neural algorithm, Composite Structures, 66(1) 627-637, 2004.
- [11] Wang D., Ye L., Lu Y. and Su Z., Probability of the presence of damage estimated from an active sensor network in a composite panel of multiple stiffeners, Composites Science and Technology, 69(13) 2054-2063, 2009.
- [12] Wang D., Ye L., Su Z. and Lu Y., Quantitative identification of multiple damage in laminated composite beams using A_0 Lamb mode, Journal of Composite Materials, 45(20) 2061-2069, 2011.
- [13] Ben B.S., Ben B.A., Vikram K. and Yang S., Damage identification in composite materials using ultrasonic based Lamb wave method, Measurement 46(2) 904-912, 2013.
- [14] Vitola J., Pozo F., Tibaduiza D.A. and Anaya M., Distributed piezoelectric sensor system for damage identification in structures subjected to temperature changes, Sensors, 17(6) 1252, 2017.
- [15] Rose J.L., Nagy P.B., Ultrasonic waves in solid media, The Journal of the Acoustical Society of America, 107(4) 1807-1808, 2014.
- [16] Yeum C.M., Sohn H., Ihn J.B. and Lim H.J., Instantaneous delamination detection in a composite plate using a dual piezoelectric transducer network, Composite Structures, 94(12) 3490-3499, 2012.
- [17] Staszewski W.J., Pierce S.G., Worden K., Philp W.R., Tomlinson G.R. and Culshaw B., Wavelet signal processing for enhanced Lamb-wave defect detection in composite plates using optical fiber detection, Opt. Eng, 36(7) 1877-1888, 1997.
- [18] Janarthan B., Mitra M., Damage Detection in Stiffened Composite Panel using Lamb Waves, EWSHM, July, 2012.
- [19] Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, ASTM D3039/D 3039M, 2008.
- [20] Ochoa P., Infante V., Silva J.M. and Groves R.M., Detection of multiple low-energy impact damage in composite plates using Lamb wave techniques, Composites Part B: Engineering, 80 291-298, 2015.
- [21] Z. Su, L. Ye, Selective generation of Lamb wave modes and their propagation characteristics in defective composite laminates, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Materials: Design and Applications, 218(2) 95-110, 2004.
- [22] Santoni G.B., Giurgiutiu V., Lamb wave-mode tuning of piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring, Journal of Vibration and Acoustics, 129(6) 752-762, 2007.
- [23] Jha R., Kim I. and Widana-Gamage D., Investigation of Incident Lamb Wave Parameters on Detection of Composite Delamination, ASME Conference Proceedings, pp. 675-683, 2010.
- [24] Toyama N., Takatsubo J., Lamb wave method for quick inspection of impact-induced delamination in composite laminates, Composites science and technology, 64(9) 1293-1300, 2004.
- [25] Su Z., Yang C., Pan N., Ye L. and Zhou L.-M., Assessment of delamination in composite beams using shear horizontal wave mode, Composites Science and Technology, 67(2) 244-251, 2007.
- [26] Su Z., Ye L., Digital damage fingerprints (DDF) and its application in quantitative damage identification, Composite Structures, 67(2) 197-204, 2005.

روشی سریع و مبتنی بر تضمین یکسان بودن شرایط مقایسه‌ای در زمینه کارکرد بهینه سامانه‌های پایش سلامت سازه‌ای می‌باشد.

- ایجاد ارتباط عددی میان ویژگی‌های سیگنال امواج فراصوت هدایت شده و مشخصات خرابی بر اساس مفهوم شاخص خرابی از دستاوردهای این پژوهش محسوب می‌گردد. مشخصه اصلی خرابی که در این مقاله به آن پرداخته شد، نوع خرابی می‌باشد.
 - شاخص خرابی شماره ۱ بر اساس کمیت آماری انحراف جذر میانگین مربعات برای مقایسه سیگنال‌های ناحیه سالم و نواحی معیوب مبتنی بر استخراج ضرایب موجک استفاده گردید که در هر ۹ وضعیت طراحی شده، نشان از رخداد تغییر در ویژگی‌های امواج منتشره در سازه به دلیل وجود خرابی داشت. در این خصوص، تاثیرپذیری این شاخص از خرابی‌ها، برای موج عبوری از روی منطقه دچار آسیب، برای تورق بیشترین میزان و برای شکاف کمترین مقدار حاصل از محاسبات و آزمایش تجربی بود.
 - مطابق مقادیر و علامت‌های جبری شاخص شماره ۲ بر اساس مقایسه بیشینه ضرایب موجک سیگنال‌ها، می‌توان مشاهده نمود، تاثیر خرابی‌های تورق و سوراخ بر روی سیگنال امواج دریافتی، خصوصیات و ماهیتی مشابه دارند. در خصوص این دو نوع خرابی، هر چند مقادیر محاسبه شده شاخص، متفاوت است، لیکن جهت تغییرات شاخص مذکور، مشابه و افزایشی بوده و این درحالی است که ماهیت تاثیر شکاف بر سیگنال امواج دریافتی از سازه، در مقایسه با دو نوع خرابی دیگر، متفاوت و جهت آن، کاهش است.
 - مقایسه نتایج عددی حاصل از هر دو شاخص (۱ و ۲) نشان می‌دهد که عبور مستقیم جبهه اصلی موج از روی خط واصل فرضی محرک، حسگر و خرابی، موجب تاثیرپذیری بیشتر موج از خرابی می‌شود. این تاثیرپذیری در حالت عبور موج از مجاورت خرابی، کمتر بوده و میزان آن وابسته به نوع خرابی است.
- بهینه‌سازی روش ارائه شده با لحاظ نمودن سایر مشخصات و ویژگی‌های خرابی (نظیر ابعاد، شدت و مکان وقوع آنها) در فرآیند طراحی شاخص، افزودن به تعداد شاخص‌ها مبتنی بر روابط معتبر آماری و ریاضی برای داده‌های گسسته و همچنین استفاده از روش‌های برازش منحنی جهت تخمین مشخصات خرابی‌هایی که هنوز حادث نشده‌اند و در نهایت تحویل مقدار عددی شاخص‌ها به عنوان ورودی به الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای تحلیل داده‌های حاصل از آزمایش با هدف کاهش خطاهای موجود در تفاسیر انسانی، موضوعاتی است که می‌تواند برای تکمیل و توسعه این روش در مطالعات و پژوهش‌های آینده مورد توجه و برنامه‌ریزی قرار گیرد.

۱۰- مراجع

- [1] Kaw A.K., Mechanics of composite materials, 2005.
- [2] Fawcett A.J., Oakes G.D., Boeing composite airframe damage tolerance and service experience, in: Composite Damage Tolerance & Maintenance Workshop, 2006.
- [3] Speckmann H., Roesner H., Structural health monitoring: A contribution to the intelligent aircraft structure, in: Proceedings of the 9th European Conference on NDT (ECNDT), Berlin, Germany, pp.17, 2006.
- [4] Garnier C., Pastor M. L., Eyma F. and Lorrain B., The detection of aeronautical defects in situ on composite structures using Non Destructive Testing, Composite structures, 93(5), 2011.
- [5] Balageas D., Fritzen C.P. and Güemes A., Structural health