نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۲، سال ۱۴۰۱، صفحات ۳۷۷ تا ۳۹۰
DOI: 10.22060/mej.2021.20233.7198

شناسایی عیب در اتصالات چسبی با استفاده از روش انتشار امواج فراصوت مبتنی بر هوش مصنوعی

مهشاد رستگار مقدم*، مجید رجبی، سید داود نیکخوی تنها

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

خلاصه: وجود عیب در اتصالات چسبی یک مسئله مهم در ساخت سازه‌های فضایی می‌باشد. در این مقاله با استفاده از امواج لمب، ویژگی‌های مناسب جهت شناسایی اندازه و موقعیت عیوب اتصالات چسبی به‌دست‌آمده است. با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود به بررسی اثر عیب بر انتشار امواج لمب پرداخته شده است. شبیه‌سازی برای سه ضخامت متفاوت چسب، سه سایز متفاوت عیب دایره‌ای در ۹ موقعیت مختلف صورت‌گرفته است و تأثیر هر یک از آنها بر موج عبوری از اتصال بررسی شده است. سیگنال‌های به‌دست‌آمده از اتصالات معیوب با سیگنال حاصل از اتصال سالم مقایسه گردیده و ناحیه موردنظر جهت تحلیل‌های بعدی از کل سیگنال دریافتی جدا شد. تفکیک مناسب و صحیح عیوب نیازمند یافتن مشخصه‌هایی مناسب برای آن است به همین جهت ۳۴ ویژگی جهت ایجاد تمایز و تفکیک عیوب بررسی گردید. در ادامه با فراهم آمدن پایه‌های ایجاد الگوهایی مناسب برای تفکیک عیوب، از شبکه عصبی استفاده شد. درصد تشخیص صحیح شبکه عصبی برای تفکیک ضخامت چسب ۹۳/۸ درصد، برای تفکیک مساحت عیوب از منظر اندازه ۱۰۰ درصد و برای تفکیک موقعیت عیب در دو محور افقی و عمودی به ترتیب ۹۶/۱ و ۹۵/۱ درصد به دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده کارایی روش تکامل فاصله بهبودیافته و ویژگی‌های انتخاب شده جهت تفکیک عیوب این‌گونه از اتصالات است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۲۳
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۸/۱۷

کلمات کلیدی:
ارزیابی غیر مخرب
موج لمب
اتصال چسبی
پایش وضعیت
شبکه عصبی

۱- مقدمه

روش بازرسی انتشار عمودی[1]، یک روش ساده و بسیار گسترده در بازرسی‌ها است. مبدل معمولاً در سطح موردنظر قرار داده می‌شود. امواج حجمی به طور معمول عمود بر سطح، جهت بازرسی شرایط در امتداد این جهت منتشر می‌شوند. ناپیوستگی در جهت انتشار بر انعکاس تأثیر گذاشته و یک بسته اضافی موج در سیگنال ایجاد می‌کند. ازآنجاکه لایه چسب معمولاً بسیار نازک است، نیاز به یک مبدل[2] با وضوح بالا برای ایجاد تمایز بین فصل مشترک‌ها در داخل منطقه چسب است [۱].

پلارسکی[3] و رز[4] [۲] امواج حجمی را به شکل مورب به‌جای امواج طولی حجمی در انتشار نرمال جهت بررسی وضعیت چسبندگی[5]، منتشر نموده‌اند. فاکتورهای بازتاب برای هر دو نوع انتشار طولی و عرضی بررسی شده است. استحکام عادی چسب برای نشان‌دادن حالت چسبندگی انتخاب شده است. فاکتور بازتاب در مقابل منحنی استحکام عادی چسب به‌دست‌آمده است. این نمودار نشان می‌دهد که انتشار مورب با استفاده از موج عرضی حساسیت بهتری به عیوب سطحی دارد.

کینرا[6] و دایال[7] [۳] روشی را برای اندازه‌گیری سرعت فاز، سرعت گروه و میرایی در نمونه‌های نازک گسترش داده‌اند. برای نمونه‌های نازک، سیگنال به دلیل طول طی شده کوتاه، هم‌پوشانی خواهد داشت. روش‌های سنتی مانند روش زمان پرواز، برای نمونه‌های نازک عملی نیستند. روش تبدیل فوریه‌ی سریع[8] برای تبدیل سیگنال زمان به حوزه فرکانس به کار برده شده و تلاش شده است که به کمک دوره‌های زمانی خود با مرجع تطابق پیدا کند. تنها سرعت فاز درست می‌تواند این دو را باهم تطبیق دهد.

هانمن[9] و همکاران [۴] این روش را برای ساختار چندلایه‌ای گسترش دادند و انتقال را از طریق پنج اتصال چسبی متفاوت بررسی کرده‌اند. مشخص

1 Normal incidence
2 Transducer
3 Pilarski
4 Rose
5 Adhesion
6 Kinra
7 Dayal
8 Fast fourour transfer
9 Hanneman

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: shadi.rastegar17@gmail.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

شده است که محدوده فرکانسی مختلف دارای حساسیت‌های متفاوت به ماده چسبانده شده و چسب می‌باشد.

موبدو[1] و همکاران [۵] انتشار مورب را با یک سیستم متمرکز شده جهت مطالعه تغییرات در دامنه سیگنال انعکاسی در حوزه فرکانس ترکیب کرده‌اند. در مورد اتصال خوب و بد (منطقه چسبی پوشش داده شده با تفلون) با دامنه‌های مختلف متمایز شده و موردمطالعه قرار گرفته است.

برادر هود[2] و همکاران [۶] به بررسی قابلیت آشکارسازی یک باند بوسیدن خشک[3] با استفاده از انتشار طولی عمودی، انتشار برشی عمودی و بازرسی مافوق صوت با توان بالا پرداخته‌اند. در اینجا دو نوع اول انتشار، تنها کرنش‌های کوچک را به نمایش می‌گذارند که در حالت پاسخ الاستیک خطی باقی می‌مانند، اما برای بازرسی مافوق صوت با توان بالا، کرنش‌های بزرگ جهت دریافت پاسخ غیرخطی معرفی شده‌اند

در مقایسه با بازرسی با استفاده از امواج حجمی، روش امواج مافوق صوت هدایت شده سریع‌تر است چراکه موج می‌تواند یک منطقه بزرگ‌تر را با نیاز به تنظیمات کمتر پوشش دهد. این امر باعث می‌شود تا این امواج نامزدهای خوبی برای هر دو نوع ارزیابی غیر مخرب و نظارت بر سلامت ساختار باشند.

روش اتصالات چسبی به طور گسترده‌ای در اتصال ساختارهای صفحه مانند استفاده می‌شوند. مواد استفاده شده در صفحات معمولاً همگن و ایزوتروپیک تصور می‌شوند. موج هدایت شده که بستگی به مرزهای دو صفحه کشش آزاد موازی دارد برای اولین‌بار توسط لمب [۷] آنالیز شده و به نام موج لمب شناخته می‌شود.

کالی[4] و الین[5] [۸] در آزمایش‌های خود به یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های امواج لمب دست‌یافتند که آن توانایی انتشار این امواج در مسافت‌های طولانی و توانایی بازرسی نواحی بزرگ می‌باشد که این خاصیت موجب کاهش هزینه‌های آزمودن سیستم می‌گردد.

رز [۹] نشان داد که حساسیت امواج لمب برای آشکارسازی عیوب از امواج مافوق صوت معمولی بیشتر است. وی همچنین گزارش کرد که آزمون با امواج لمب سریع‌تر و هزینه آن بسیار کمتر از تکنیک‌های فراصوتی معمولی و دیگر روش‌های بازرسی است.

پیلارسکی و رز [۱۰] معیار انتخاب مد پیشنهاد می‌دهند که بر اساس تغییر منحنی دیسپرژن و توزیع جابه‌جایی باشد. با استفاده از روش ماتریس کلی، منحنی در دیسپرژن برای شرایط فصل مشترک‌های مختلف، محاسبه و مقایسه شده است. باید اشاره نمود که انتخاب مد نباید صرفاً به منحنی دیسپرژن بستگی داشته باشد چراکه توزیع جابه‌جایی می‌تواند به طور قابل‌توجهی بدون تغییر زیاد در سرعت فاز تغییر نماید، بنابراین توزیع جابه‌جایی و توان، در مقطع مورد بررسی قرار گرفت و معیاری از ترکیب جابه جایی و جریان توان در همسایگی فصل مشترک ارائه گردید.

سینگر[6] و همکاران [۱۱] پیشنهاد دادند که سرعت انتشار موج می‌تواند به‌عنوان یک شاخص از مشخصه مواد در لایه چسب باشد. پس از آن، سرعت موج هدایت شده و تفاوت در مشخصه فرکانسی جهت ایجاد تمایز در شرایط اتصالات مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

مصطفی[7] و همکاران [۱۲] از مد s_0 جهت بازرسی شرایط اتصالات لب به لب[8] و تسمه پارگی[9] در اتصالات چسبی استفاده نموده است. برای مورد تسمه پارگی، اتصال صحیح مرتبط با دامنه بالا است درحالی‌که عدم اتصال مرتبط با دامنه پایین می‌باشد. بااین‌حال، برای مورد تسمه پارگی، اتصال خوب مرتبط با دامنه پایین است چرا که انرژی در تقویت‌کننده‌ها[10] نشت می‌کند و اتصال بد مرتبط با دامنه بالا می‌باشد چراکه انرژی در پوسته نگه داشته می‌شود.

لو[11] و همکاران [۱۳] در تحقیق خود به بررسی حساسیت امواج لمب نسبت به عیوب پرداخته‌اند. آن‌ها همچنین برای مرتبط نمودن مدهای موج با اندازه‌های عیوب و توان انعکاسی موج تلاش نمودند نقایصی مختلفی با ابعاد متفاوت را در این تحقیق مورد بررسی قرار دهند.

با استفاده از روش المان محدود، لو و همکاران [۱۴] انتقال امواج لمب را در سراسر منطقه اتصالی موردمطالعه قرار داده است. سه مد s_0 و a_0 و a_1 در نظر گرفته شده و ضرایب انتقالی از نتایج شبیه‌سازی محاسبه گردیده‌اند.

لازاندا دی اسکالا[12] و همکاران [۱۵] شرایط مختلف اتصالات، یعنی اتصال سالم چسب، عدم چسبندگی و چسبندگی ضعیف را با استفاده از هر دو مد a_0 و s_0 در فرکانسه های مختلف موردمطالعه قرارداده اند. نتایج نشان داد که عدم چسبندگی میرایی شدیدی در سیگنال‌های دریافتی ایجاد می‌کند،

1 Moidu
2 Brotherhood
3 Dry kissing bond
4 Cawely
5 Alleyne

6 Singher
7 Mustafa
8 Lap splice
9 Tear strap
10 Amplifier
11 Lowe
12 Lanza di Scalea

اما برای چسبندگی ضعیف، s_0 مد با جابه‌جایی غالباً درون صفحه‌ای در چسب، حساسیت بالاتری را نشان می‌دهد. توضیح این امر آن است که چسبندگی ضعیف نمی‌تواند تنش‌های برشی و موج نوع برشی را به شکلی مؤثر پشتیبانی کند، بنابراین مد با جابه‌جایی غالباً درون صفحه‌ای دچار میرایی شدیدتری نسبت به جابه‌جایی خارج از صفحه درزمانی که موج از یک محیط چسبنده به محیط دیگر نفوذ می‌کند، خواهد شد.

مطالعه پارامتری برای اتصالات پله‌ای توسط پوژیلاژ[1] و همکاران [۱۶] انجام شده است ، پارامترهای هندسی، خواص مواد و حضور عیوب می‌توانند بر طیف عبوری امواج لمب تأثیر بگذارند. افزایش ضخامت چسب موجب کاهش انتقال مد s_0 می‌شود. حضور عیوب باعث افزایش کمینه طیف مدهای مد s_0 و مد s_1 می‌شود.

لی کروم[2] و کستینگز [۱۷] از مد موج افقی برشی برای پی بردن به وضعیت چسبندگی استفاده نموده است. مدول های برشی لایه چسب در زمان پخت مختلف را می‌توان با مقادیر سرعت فاز مد برش افقی مشاهده نمود.

دالتون[3] و همکاران [۱۸] در تحقیق خود با استفاده از امواج مافوق صوت لمب به تعیین ابعاد اصلی دو شکل اتصال چسبی بین صفحات فلزی پرداخته‌اند. از داده‌های دامنه فرکانسی به‌عنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی، جهت آموزش و ایجاد ارتباط بین ویژگی‌ها در داده‌های ورودی با ابعاد اصلی اتصال استفاده می‌شود. استفاده از وزن‌های مناسب باعث فراهم آمدن ویژگی‌هایی در سیگنال موج لمب که زیربنای موفقیت آمیز بودن عملیات است، می‌گردد.

بورک[4] و چالیس[5] [۱۹] کاربردی جدید از امواج مافوق صوت لمب همراه با روش شبکه عصبی جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها برای یک ارزیابی غیر مخرب از اندازه فیلت چسب در رأس یک اتصال آلومینیومی را تشریح کرده‌اند. امواج دریافتی به کمک آنالیز فوریه سریع به حوزه فرکانس برده شده و پس از آن یکی از پایه‌ای‌ترین شکل شبکه‌های عصبی مصنوعی، یعنی شبکه خطی، جهت شناخت شعاع فیلت اتصال آموزش‌داده‌شده است.

رایوتلا[6] و گپالاکرشنان [۲۰] با استفاده از شبکه‌های یادگیری عمیق مانند شبکه‌های عصبی کانولوشن و تکرار شونده برای تقریب عددی حل مسئله معکوس استفاده کردند و یک استراتژی ترکیبی از طبقه بندی و رگرسیون در یک محیط تحت نظارت برای شناسایی آسیب و ترکیب محلی ارائه کردند.

هدف از انجام این تحقیق بررسی تأثیر عیوب اتصال چسبی بر روی امواج لمب در هنگام عبور از این اتصال است. به‌عبارتی‌دیگر هدف یافتن شاخصی مناسب از سیگنال دریافتی با به‌کاربردن تنها یک حسگر است تا بتوان به کمک این شاخص ویژگی‌های عیوب موجود در چسب را استخراج نمود. برای این منظور ابتدا مدل‌سازی‌های عددی به‌صورت سه‌بعدی صورت خواهد پذیرفت و تغییرات پارامترهایی از قبیل اندازه ضخامت چسب، موقعیت و اندازه عیب دایره‌ای بررسی خواهد شد.

۱- ۱- پدیده دیسپرژن

در اکثر مواد جامد و سیال، سرعت انتشار موج به خواص فیزیکی و مکانیکی ماده مانند: چگالی ضریب الاستیک بستگی دارد. در فلزات سرعت موج مستقل از فرکانس است. در قطعاتی که از هندسه خاصی برخوردارند مانند ورق‌ها و پوسته‌ها سرعت انتشار تابعی از فرکانس و ضخامت است. در نتیجه امواج سینوسی باهم ترکیب می‌شوند و به‌صورت یک دسته موج در ماده حرکت می‌کنند. به این پدیده دیسپرژن می‌گویند. به قطعاتی که این امواج در آن منتشر می‌شوند محیط دیسپرسیو می‌گویند. سرعتی که دسته امواج سینوسی به‌صورت بسته موج در ماده حرکت می‌کنند سرعت گروه می‌نامند و با c_g نمایش داده می‌شود.

$$C_g = C_p^2\left[C_p - (fd)\frac{dC_p}{d(f\,d)}\right]^{-1} \quad (۱)$$

$$C_p = \left(\frac{\omega}{2\pi}\right)\cdot\lambda_{wave} \quad (۲)$$

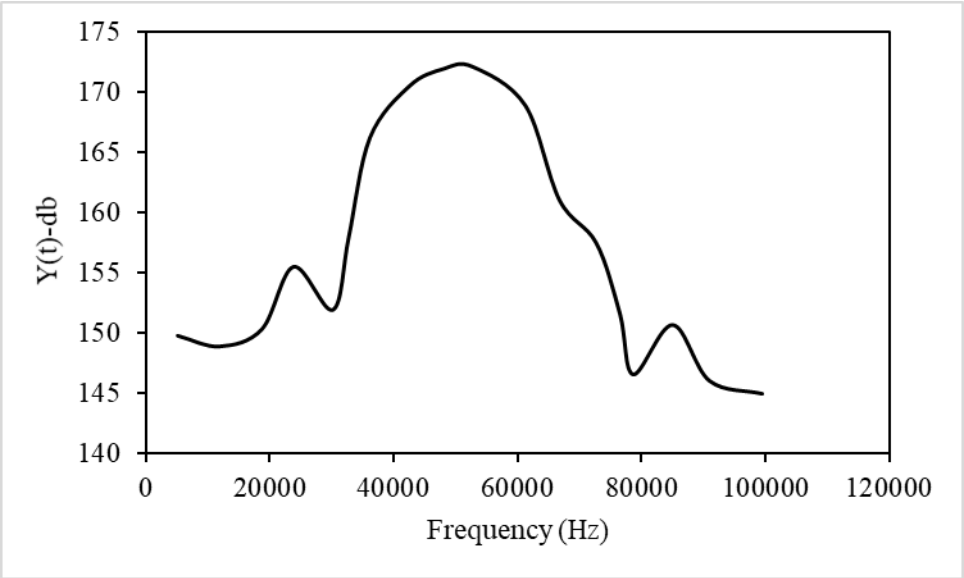
که در روابط فوق داریم: ω فرکانس موج، d ضخامت ورق و f فرکانس مرکزی موج است.

۲- مدل‌سازی عددی انتشار موج

۲- ۱- تعیین فرکانس موج جهت انجام بازرسی

برای تحریک باید از سیگنالی مناسب استفاده نمود که دارای زمان تحریک مناسب و پهنای باند مطلوب باشد تا از اثرات نامطلوب مربوط به

1 Puthillath
2 Le Crom
3 Dalton
4 Bork
5 Challis
6 Rautela



شکل ۱. تبدیل فوریه سریع سیگنال تحریک تون برست ۵

Fig. 1. Fast Fourier transform of tone burst excitation signal 5

دیسپرژن جلوگیری شود. در این مقاله، برای دستیابی به سیگنال مطلوب جهت فعال‌سازی امواج ورقی از سیگنال تون برست دریچه‌ای استفاده گردید. رابطه‌ای که از آن برای تولید سیگنال در محیط نرم‌افزاری استفاده شده، عبارت است از:

$$A(t)=\frac{1}{2}\times\sin(2\pi ft)\times\left(1-\cos\left(\frac{2\pi f}{N}t\right)\right) \qquad (۳)$$

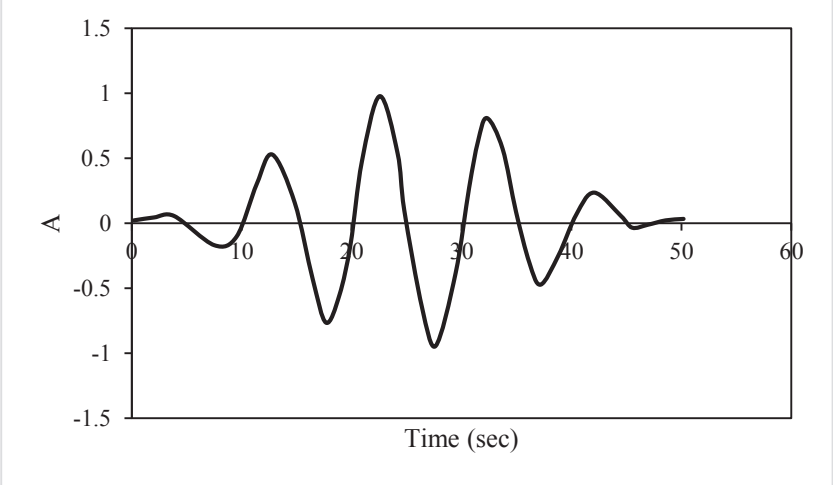
در معادله (۳)، f فرکانس میانی تحریک برحسب هرتز و N تعداد سیکل‌های سیگنال تون برست است. تبدیل فوریه‌ی سریع سیگنال تولیدشده به کمک معادله (۳) به ازای (N = ۵) در شکل ۱ قابل مشاهده است. علاوه بر فرکانس میانی تحریک که بر اساس فرکانس تحریک تعیین گردیده، تعداد سیکل‌های تون برست نیز از پارامترهای قابل تنظیم است که به طور مستقیم بر طول زمانی سیگنال و پهنای باند آن، اثرگذار است. به اینصورت که با افزایش تعداد سیکل‌های سیگنال تحریک تون برست، پهنای باند کاهش می‌یابد ولی طول زمانی سیگنال افزایش پیدا می‌کند. در این مساله از یک سیگنال تحریک ۵ سیکلی مانند شکل ۲ برای ایجاد امواج ورقی استفاده می‌شود. اگرچه کوچک شدن پهنای باند در اثر افزایش تعداد سیکل‌های تون برست ویژگی مثبتی برای انتشار موج و جلوگیری از دیسپرژن شدن است، اما افزایش مدت زمان تولید سیگنال باعث می‌شود که سیگنال تحریک درزمانی که هنوز به‌صورت یک بسته کامل تولید نشده است، توسط حسگرهای دیگر ثبت شود و این امر منجر به پیچیدگی در تحلیل شهودی انتشار موج می‌گردد؛ بنابراین انتخاب بهینه پارامترهای سیگنال تحریک بر مبنای یک مصالحه میان معیارهای طراحی صورت می‌گیرند.

۲- ۲- مدل‌سازی المان محدود اتصال چسبی

در این مدل‌سازی دو ورق آلومینیومی و چسب میان آنها که اتصال لبه به لبه را تشکیل داده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. این ساختار به‌صورت شماتیک در شکل ۳ نشان‌داده‌شده است. در این شبیه‌سازی b برابر با ۲۰۰ میلی‌متر ، a برابر با ۵۰ میلی‌متر و s برابر با ۰/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. خواص ورق آلومینیوم و چسب در جدول ۱ آمده است.

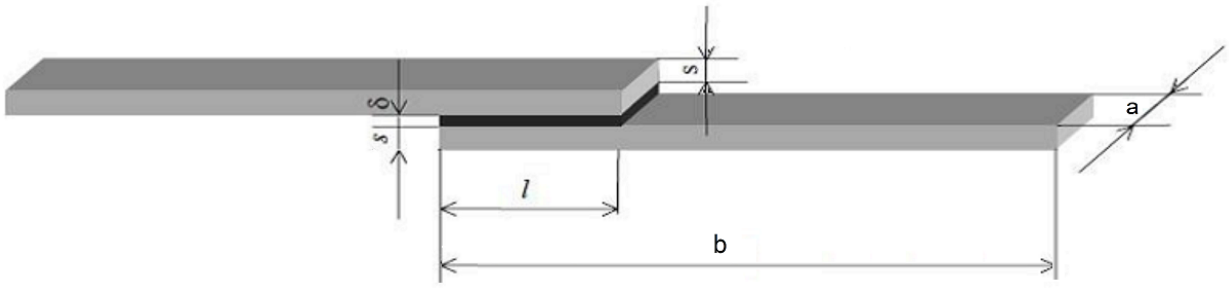
۲- ۳- پارامترهای شبیه‌سازی المان محدود

جهت شبیه‌سازی صحیح این اتصال در ابتدا باید تعدادی از پارامترهای



شکل ۲. دامنه سیگنال در حوزه زمان

Fig. 2. Signal amplitude in the time domain



شکل ۳. شماتیکی از تنظیمات ایجاد شده در شبیه‌سازی

Fig. 3. Schematic of the settings created in the simulation

جدول ۱. خواص آلومینیوم و چسب به‌کاررفته در شبیه‌سازی المان محدود

Table 1. Properties of aluminum and adhesive used in finite element simulation

جنس	چگالی	مدول یانگ	نسبت پواسون
آلومینیوم	۲۷۰۰	۷۰	۰/۳۳
چسب	۱۱۰۴	۲/۵۶	۰/۴۲

اساسی مورد بررسی قرار گیرند. در این بخش، دو ملاک اصلی المان محدود بیان می‌شوند، که دقت نتایج مدلسازی را تحت الشعاع قرار می‌دهند:

۲- ۳- ۱- بازه زمانی

روش حل ضمنی در بازه‌های زمانی خیلی کوچک، از زمان انتگرال‌گیری می‌کند. این عملگر فقط به‌صورت مشروط پایدار است. شرط پایداری، برابر بودن زمان عبور از کوچک‌ترین ابعاد اجزاء برای یک موج الاستیک در مدل است. پیش‌فرض این روش حل برای محاسبه این بازه زمانی به‌صورت خودکار چنین است:

$$\Delta t \approx \frac{le_{\min}}{C_L} \qquad (۴)$$

که le_{min} کوچک‌ترین المان در مدل و c_l سرعت موج طولی است. این ارزیابی تقریبی است؛ بنابراین ارزیابی محافظه کارانه به‌صورت زیر است:

$$\Delta t \approx \frac{le_{\min}}{\sqrt{2}C_L} \qquad (۵)$$

اگرچه بازه زمانی محاسبه شده توسط روش حل صریح نتایج را حاصل می‌کند، ولی باید دو واقعیت در نظر گرفته شود. اگر بازه زمانی زیاد شود، ارتعاشات با فرکانسی زیاد قابل‌حل نیستند و عملیات حل ممکن است ناپایدار شود. در بازه زمانی کوتاه نیز محاسبات بیهوده زیادی انجام می‌شود. در مرجع [۲۱] قانون مناسب برای ارتباط بازه زمانی و حداکثر فرکانس مورد بررسی به این صورت پیشنهاد شده است:

$$\Delta t = \frac{1}{20 f_{\max}} \qquad (۶)$$

۲- ۳- ۲- اندازه المان

اندازه المان باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که موج منتشرشده به‌دقت دیده شود. مرجع [۲۱] تعداد المان به ازای هر طول موج را ۲۰ عدد پیشنهاد کرده است. درنهایت می‌توان از معادله (۷) برای محاسبه‌ی طول المان استفاده کرد:

$$l_e = \frac{\lambda_{\min}}{20} \qquad (۷)$$

که l_e طول المان، λ_{min} کوتاه‌ترین طول موج است. کوتاه‌ترین طول موج را می‌توان با سرعت موج برشی و حداکثر فرکانس تخمین زد که منجر به رابطه زیر می‌شود:

$$l_e = \frac{\lambda_{\min}}{20} \approx \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{20 f_{\max}} \qquad (۸)$$

که E مدول یانگ و ρ چگالی قطعه می‌باشد مقدار طول هر المان باید کمتر از ۰/۰۱ میلی‌متر در نظر گرفته‌شود.

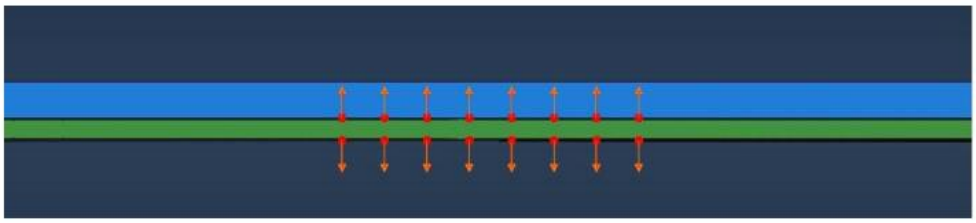
۲- ۴- تحریک و دریافت سیگنال

همان گونه که در بخش‌های پیش اشاره شد سیگنال تحریک تون برست ۵ سیکلی است. تحریک با اعمال جابه‌جایی جزئی و با کمک معادله (۳) به ۸ گره موجود در یک راستا انجام پذیرفته است. همچنین همان گونه که مشخص گردید مد مناسب جهت بازرسی، مد $s_{.}$ می‌باشد. جهت ایجاد مد $s_{.}$ جا بجایی در دو سمت صفحه و به شکل عکس هم در بالا و پایین صفحه اعمال شده تا تنها، مد متقارن در جسم انتشار یابد. این مطالب در شکل ۴ نشان‌داده‌شده است.

سیگنال پس از عبور از چسب به کمک اندازه‌گیری جابه‌جایی در یک ند دریافت گردیده است. لازم به ذکر است که فاصله ندهای محرک و ند دریافت‌کننده سیگنال تا چسب یکسان می‌باشد.

۲- ۵- تحلیل المان محدود نمونه سالم و معیوب

در این پژوهش چسب کامل با ابعاد ۵۰ ×۵۰ میلیمتر و در سه ضخامت متفاوت مدل‌سازی شده است. همچنین عیب در سه اندازه مختلف در نه موقعیت ایجادشده که درمجموع سه نمونه سالم و ۸۱ نمونه معیوب مدل‌سازی شده‌اند. مقادیر و تعداد متغیرها در این شبیه سازی به دلخواه و صرفاً جهت نشان دادن حساسیت سیگنال دریافتی به تغییر ضخامت چسب



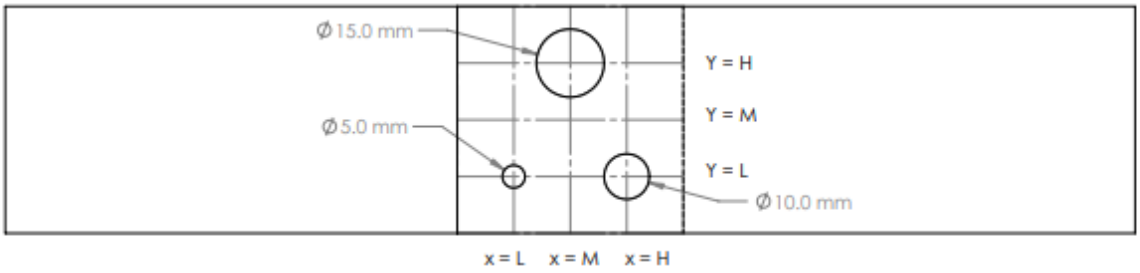
شکل ۴. اعمال جابه‌جایی بر ورق آلومینیومی و تحریک آن

Fig. 4. Applying displacement on aluminum sheet and its excitation

جدول ۲. پارامترهای به‌کاررفته شده در شبیه‌سازی

Table 2. Parameters used in simulation

پارامتر	حداقل	متوسط	حداکثر
ضخامت چسب	۰/۲	۰/۵	۱
مساحت چسب	۵	۱۰	۱۵
محور افقی	۱۲/۵	۲۵	۳۷/۵
محور عمودی	۱۲/۵	۲۵	۳۷/۵



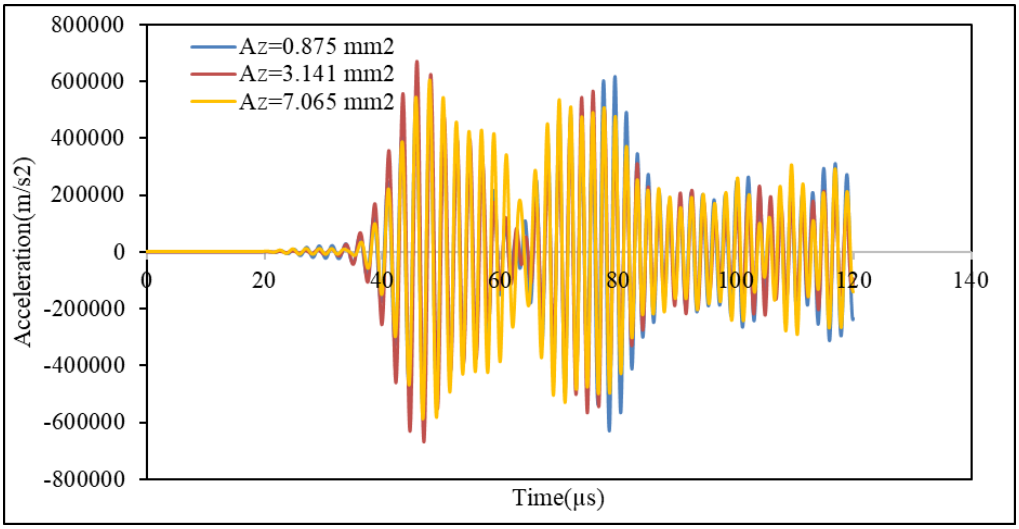
شکل ۵. شماتیکی از عیوب ایجاد شده در چسب

Fig. 5. Schematic of defects created in the adhesive

و وجود عیب در موقعیت‌های مختلف چسب می‌باشد. این عیوب به‌صورت شماتیک در شکل ۵ نشان‌داده‌شده است. اندازه‌های متغیر اشاره شده هر عیب مربوط به پارامترهای آنها هستند. مقادیر به‌صورت میلی‌متر می‌باشند که در جدول ۲ نشان‌داده‌شده است.

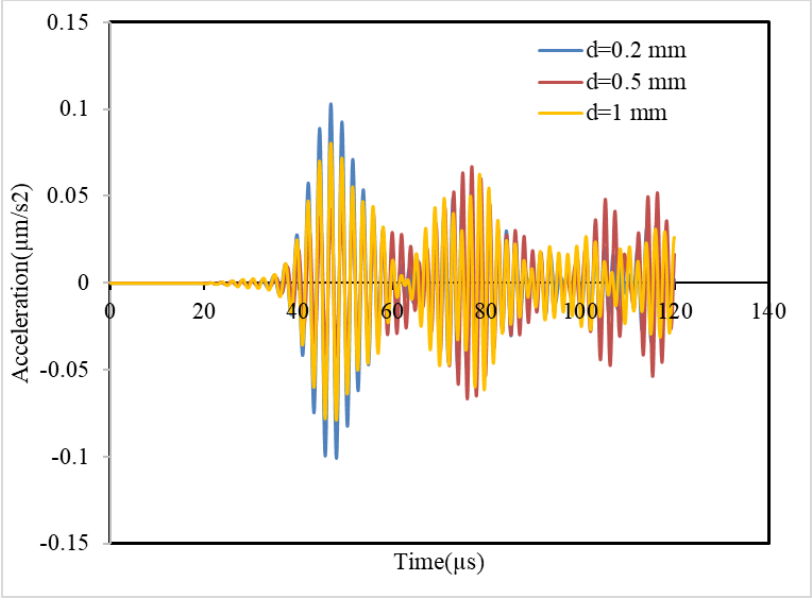
در شکل ۶ سه نمونه از سیگنال‌های دریافتی در سه مساحت متفاوت نشان‌داده‌شده‌اند. همان گونه که مشاهده می‌شود با تغییر مساحت عیب سیگنال‌های دریافتی توسط حسگر نیز تغییر می‌کند.

در شکل ۷ سه نمونه از سیگنال‌های دریافتی در سه ضخامت متفاوت نشان‌داده‌شده‌اند. همان گونه که مشاهده می‌شود با تغییر ضخامت چسب، سیگنال‌های دریافتی توسط حسگر نیز تغییر می‌کند.



شکل ۶. نمودار شتاب برحسب زمان در قطعه‌ای با عیوبی در سه مساحت متفاوت

Fig. 6. Acceleration diagram in terms of time in a piece with defects in three different areas



شکل ۷. نمودار شتاب برحسب زمان در قطعه‌ای بدون عیب در سه ضخامت چسب متفاوت

Fig. 7. Acceleration diagram in time on a defective piece in three different adhesive thicknesses

جدول ۳. امتیاز نرمال ویژگی‌ها در حالت شبیه‌سازی

Table 3. Normal rating of properties in simulation mode

ویژگی	امتیاز نرمال شده
میانگین*	۰/۹۹۲
ریشه میانگین مربعات*	۰/۹۶۱
کشیدگی	۰/۹۸۶
انحراف معیار*	۰/۹۷۲
فاکتور کرست*	۰/۹۶۱

۳- مدل‌سازی عددی انتشار موج

روش ارزیابی فاصله توسعه‌ای روش یک روش قدرتمند از زیرمجموعه‌های روش‌های تابع ارزیابی مبتنی بر فاصله می‌باشد.

بهترین ویژگی باید دو شرط زیر را داشته باشد:

مقادیر آن برای یک طبقه (تصمیم) به یکدیگر تا حد ممکن نزدیک باشند.

مقادیر مجموعه آنها برای دوطبقه متفاوت (تصمیم) تا حد ممکن از یکدیگر دور باشند.

در این روش با استفاده از نوعی میانگین‌گیری از مقادیر ویژگی‌ها و فاصلهٔ بین مراکز قرارگیری آنها در صفحه، به هر ویژگی یک امتیاز اختصاص داده می‌شود. درنتیجه هرچقدر امتیاز یک ویژگی بیشتر باشد یعنی مقادیر آن ویژگی برای سیگنال‌های دو کلاس متفاوت، از هم دورتر هستند و برای یک طبقه به هم نزدیک‌تر می‌باشند. سپس با قراردادن یک حد آستانه، ویژگی‌هایی که امتیازشان بالاتر از حد آستانه باشد، به‌عنوان ویژگی‌های برتر انتخاب می‌گردند.

در این مرحله شبیه‌سازی در ۴ مرحله متفاوت و هر مرحله در سه کلاس که هرکدام دارای ۲۷ نمونه است، انجام شده است. برای یافتن ویژگی جهت تفکیک ازنظر ضخامت چسب، مساحت عیب و موقعیت عیب ما برای الگوریتم تعیین ویژگی میزان آستانه ۰/۹۵ را در نظر گرفته‌ایم، یعنی ویژگی‌هایی قابل‌قبول می‌باشند که میزان امتیاز نرمال آنها بیشتر از مقدار ۰/۹۵ است.

به کمک روش تکامل فاصله بهبودیافته[1] و الگوریتم بیان شده امتیاز ویژگی‌های معرفی شده استخراج گردیده و در جدول ۳ نشان‌داده‌شده است.

۳- ۱- استفاده از شبکه عصبی

طراحی و آموزش شبکه عصبی مراحل اصلی در فرآیند پایش سلامت سازه‌ای توسط امواج فراصوت هدایت شده و با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی را می‌توان در قالب موارد زیر به طور خلاصه بیان نمود [۲۲]:

استخراج ویژگی از سیگنال‌های امواج به کمک روش‌های پیشرفته پردازش سیگنال از جمله تبدیل موجک

ایجاد اثر انگشت دیجیتال برای هر نوع از خرابی یا هر شدت از یک نوع خرابی (اثر منحصر به فرد هر خرابی روی امواج منتشره در سازه)

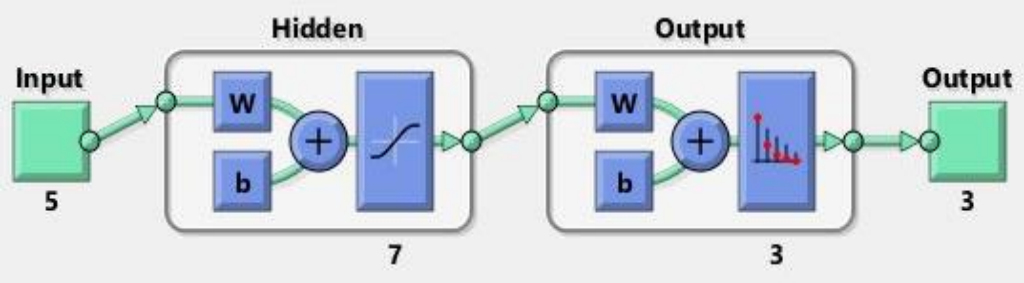
کنار هم قراردادن داده‌های حاصل از مرحله قبل و ایجاد بانک اطلاعاتی از مشخصات خرابی

طراحی و آموزش شبکه عصبی توسط رکوردهای بانک اطلاعاتی به دست آمده در مرحله قبل

استخراج داده‌های دریافتی از الگوریتم شبکه عصبی، مقایسه آن با داده‌های واقعی و تعیین بازدهی شبکه عصبی

شبکه عصبی یک سیستم محاسباتی است که در حل مسائلی که روند تابع گرا ندارند مورداستفاده قرار می‌گیرد و مدل‌سازی را انجام می‌دهد. شبکه عصبی قبل از تفسیر نتایج نیاز به آموزش دارد. در این پژوهش ابتدا ۷۰ درصد از داده‌ها برای مرحله آموزشی، ۱۵ درصد آنها جهت اعتبارسنجی که داده‌هایی نامعلوم بوده و شبکه را در طی آموزش امتحان می‌کنند و ۱۵ درصد نیز جهت محک که این داده‌ها نیز نامعلوم هستند ولی پس از آموزش شبکه آن را می‌آزمایند، انتخاب می‌کنیم. همچنین داده‌های آزمایش و اعتبارسنجی به‌صورت تصادفی و به‌صورت کاملاً پراکنده از بین مجموعه اصلی داده‌ها انتخاب شده‌اند. در زمان آموزش که داده‌ها درون شبکه پردازش می‌شوند تا به لایه خروجی برسند. خطا یا اختلاف محاسبه شده بین داده‌ها در مرحله

1 Improved Distance Evolution (IDE)



شکل ۸. شماتیک شبکه عصبی با یک‌لایه مخفی دارای ۷ نود، ۵ ورودی و ۳ خروجی

Fig. 8. Schematic of a neural network with a hidden layer with 7 nodes, 5 inputs and 3 outputs

برگشت پردازش شده و برای دقیق‌تر شدن وزن‌ها و بایاس‌های هر نورون به لایه قبلی پس رانده می‌شود. این عمل تا زمانی که شبکه همگرا شود و میزان مربع‌های خطا یا ریشه میانگین مربع خطاها در آن به حداقل برسد ادامه می‌یابد. هر زمان که خطا در پیش‌بینی شبکه به حداقل برسد وزن‌ها و بایاس‌ها ثابت نگه‌داشته می‌شوند. همچنین توابع آموزشی مختلف و نیز تعداد لایه‌های میانی و نورون‌های آن‌ها می‌تواند بر بهبود شبکه عصبی مؤثر باشند. به همین دلیل توابع آموزشی مختلف با تعداد لایه‌های میانی و تعداد نورون‌های مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در این بخش جهت تشخیص ضخامت چسب، مساحت عیب و موقعیت آن به کمک شبکه عصبی از الگوریتم تشخیص الگو نرم‌افزار متلب استفاده خواهیم نمود. در مسائل تشخیص الگو، ما به دنبال یک شبکه عصبی برای طبقه‌بندی ورودی به مجموعه‌ای از دسته‌بندی‌های هدف هستیم. به همین جهت از بهترین ویژگی به‌دست‌آمده در هر بخش به‌عنوان ورودی آن بخش استفاده شده تا بتوان بهترین تفکیک را به کمک شبکه عصبی پیاده‌سازی کرد.

۴-نتایج شبکه عصبی برای امواج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی

بهترین ساختار شبکه عصبی در این تحقیق از یک‌لایه ورودی ۵ نورون ورودی، یک‌لایه میانی با ۷ نورون میانی و یک‌لایه خروجی با ۳ نورون خروجی تشکیل شده است در این روند میانگین توان دوم خطا با مقدار ۰/۰۲۰۶ به‌دست‌آمده است.

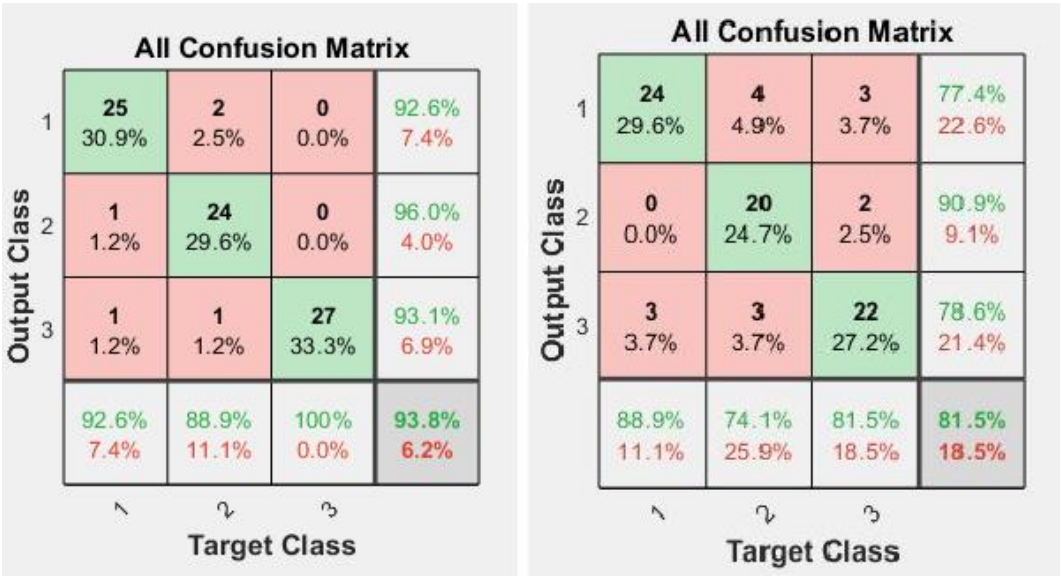
در این مقاله، جهت ارزیابی روش مذکور، در هر مرحله داده‌های اندازه‌گیری که در روند تحلیل بکار می‌روند، ۳ درصد خطای اتفاقی (مثبت و منفی) در داده‌های اندازه‌گیری درنظر گرفته می‌شود، هردو نمودار جهت محک بهتر در کنار هم رسم شده‌اند. شبکه عصبی آموزش‌داده‌شده در شکل ۹ نشان‌داده‌شده است. نمودار سمت چپ، داده‌های اصلی و نمودار سمت راست داده‌های همراه با خطای مصنوعی هستند.

همان گونه که پیش‌ازاین نیز بیان گردید تعداد ۸۱ نمونه برای آموزش شبکه عصبی ساخته شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود در حالت بدون خطا از تعداد ۲۷ نمونه که مربوط به گروه ضخامت ۰/۲ میلی‌متر هستند ۲۵ عدد به‌درستی طبقه‌بندی شده‌اند. برای ضخامت ۰/۵ میلی‌متر یک نمونه به‌اشتباه در ضخامت ۱ میلیمتر و دو عدد در ضخامت ۰/۲ طبقه‌بندی شده است. برای ضخامت ۱ میلی‌متر همه نمونه‌ها به‌درستی طبقه‌بندی شده‌اند. در نهایت شبکه عصبی گروه‌های ضخامت ۰/۲، ۰/۵ و ۱ میلی‌متر را به ترتیب با ۹۲/۶، ۸۸/۹ و ۱۰۰ درصد از یکدیگر طبقه‌بندی می‌کند.

بهترین ساختار شبکه عصبی برای تشخیص مساحت عیب از یک‌لایه ورودی ۵ نورون ورودی، یک‌لایه میانی با ۸ نورون میانی و یک‌لایه خروجی با ۳ نورون خروجی تشکیل شده است در این روند میانگین توان دوم خطا برای داده‌های بدون خطا با مقدار ۰/۰۳۵ به‌دست‌آمده است. محک شبکه عصبی آموزش‌داده‌شده با تابع trainbr در شکل ۱۰ نشان‌داده‌شده است.

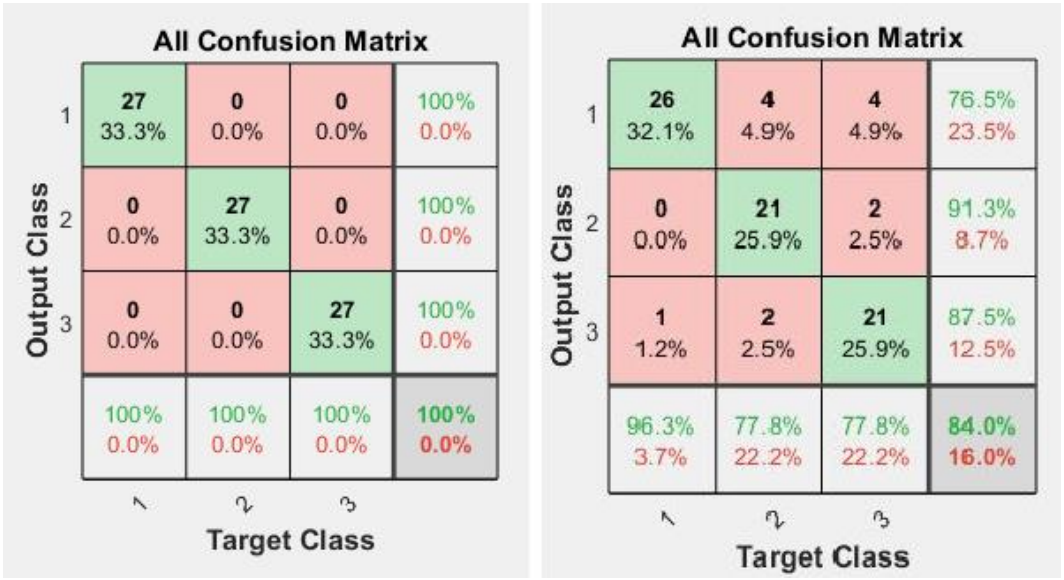
همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود از تعداد ۲۷ نمونه مربوط به هر گروه قطر ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر در حالت بدون خطا، همگی به‌درستی طبقه‌بندی شده‌اند.

برای تشخیص موقعیت عیب از دو شبکه عصبی جداگانه استفاده



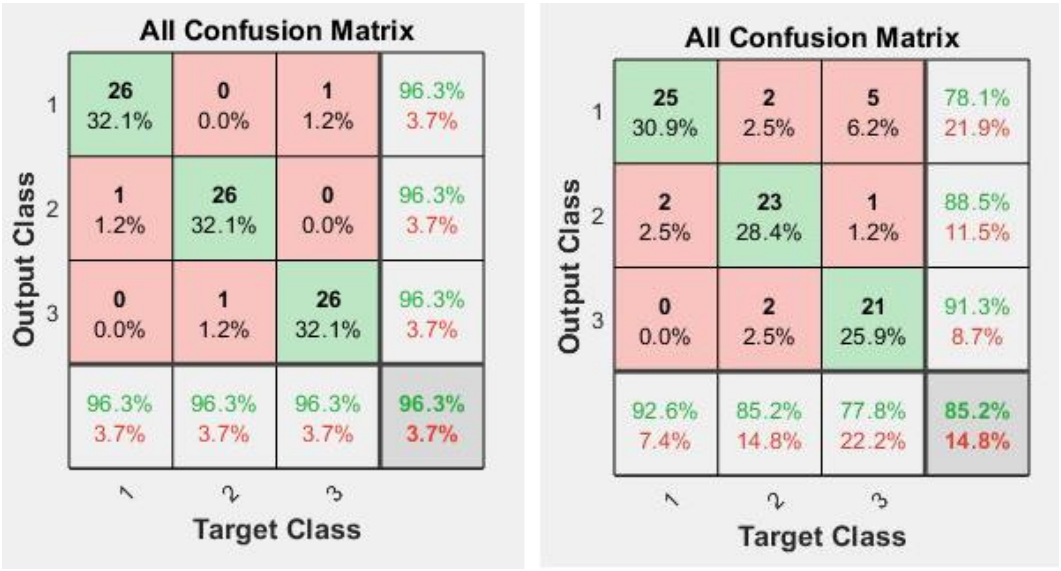
شکل ۹. میزان دقت شبکه در تشخیص صحیح ضخامت چسب با داده‌های شبیه‌سازی (شکل سمت چپ) و با افزودن سه درصد خطای تصادفی به داده‌های شبیه‌سازی (شکل سمت راست)

Fig. 9. Grid accuracy in accurately detecting adhesive thickness with simulation data (left Fig.) and adding 3% random error to simulation data (right Fig.)



شکل ۱۰. میزان دقت شبکه در تشخیص صحیح مساحت عیب با داده‌های شبیه‌سازی (شکل سمت چپ) و با افزودن سه درصد خطای تصادفی به داده‌های شبیه‌سازی (شکل سمت راست)

Fig. 10. Network accuracy in correctly diagnosing the fault area with simulation data (left Fig.) and adding three percent random error to the simulation data (right Fig.)



شکل ۱۱. میزان دقت شبکه در تشخیص صحیح تشخیص موقعیت افقی عیب با داده‌های شبیه‌سازی (شکل سمت چپ) و با افزودن سه درصد خطای تصادفی به داده‌های شبیه‌سازی (شکل سمت راست)

Fig. 11. Network accuracy in correctly detecting the horizontal position of the defect with the simulation data (left Fig.) and adding three percent random error to the simulation data (right Fig.)

می‌شود، یکی جهت تشخیص موقعیت در محور افقی و دیگری جهت تشخیص موقعیت در محور عمودی.

محک شبکه عصبی آموزش‌داده‌شده برای هر دو موقعیت محور افقی و محور عمودی با تابع trainbr در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

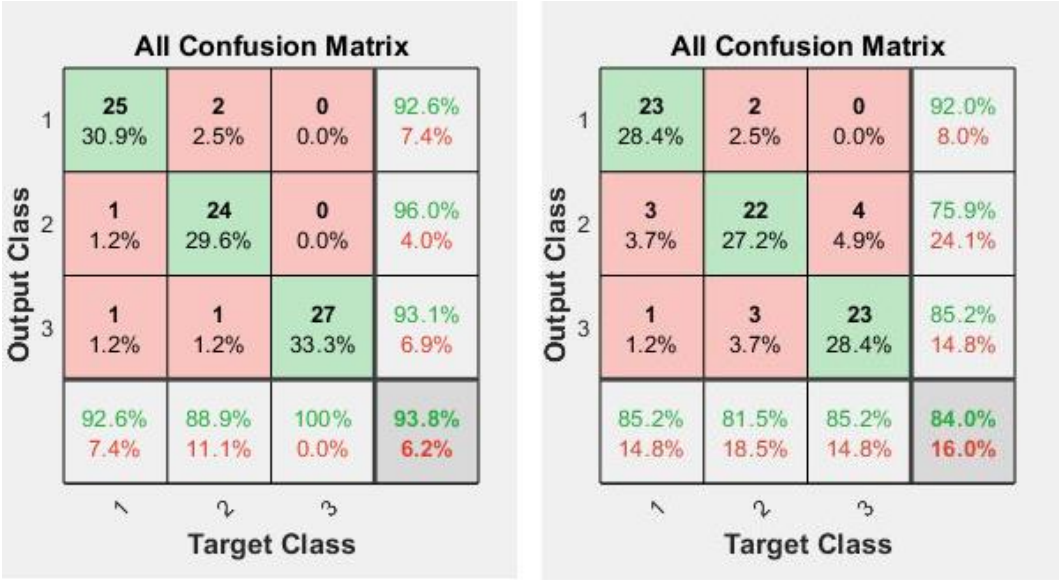
۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، وجود عیب در یک اتصال چسبی میان دو ورق آلومینیومی فرض شد. سپس با استفاده از شبکه عصبی، امکان تشخیص موقعیت عیب در راستای محور افقی و محور عمودی و نیز ضخامت چسب مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از روش تکامل فاصله بهبودیافته ویژگی‌های میانگین، ریشه میانگین مربعات، کشیدگی و ... به منظور آموزش شبکه عصبی انتخاب شد. همچنین روش بهینه آموزش با آزمون‌وخطا تابع trainbr بدست آمد. در نرم‌افزار آباکوس[1] مدل سه‌بعدی از دو ورق با مشخصاتی که پیشتر آمده، شبیه‌سازی و در ۸۱ حالت مختلف عیوبی در چسب ایجاد شد. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها تفاوت‌های معناداری داشتند که از داده‌های خام سنسور و تبدیل فوریه‌ی این داده‌ها، قابل تشخیص نبوده و برای دسته‌بندی خروجی‌ها نیاز به استفاده از شبکه عصبی دیده‌شد. پیاده‌سازی شبکه عصبی منجر به عملکردی بهینه در دسته‌بندی نمونه‌های شبیه‌سازی‌شده و تشخیص عیوب شد. جهت ارزیابی روش مذکور، در هر مرحله داده‌های اندازه‌گیری که در روند تحلیل بکار می‌روند با مقدار ۳ درصد خطای تصادفی (مثبت و منفی) درنظر گرفته شد و همانطور که مشاهده گردید در هر قسمت با وجود اضافه شدن مقداری خطای مصنوعی، شبکه عصبی به درستی طبقه بندی را انجام داد.

از نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به این مورد اشاره کرد که تنها با استفاده از اطلاعات دریافتی از یک سنسور، چهار پارامتر مساحت عیب، ضخامت چسب و موقعیت عیب در راستای محورهای افقی و عمودی به‌صورت هم‌زمان محاسبه می‌گردد. این روش، علاوه بر ایجاد سهولت در پایش وضعیت اتصالات چسبی، هزینه این فعالیت را نیز بسیار کاهش می‌دهد.

پیشنهاد می‌شود در ادامه این پژوهش، امکان استفاده از این روش در مواد کامپوزیتی و مواد غیر همسانگرد بررسی گردد. همچنین می‌توان اثر تغییر چسب استفاده‌شده در اتصال میان دو ورق را در عملکرد روش پیشنهادشده در این مقاله مورد بررسی قرارداد.

1 Abaqus



شکل ۱۲. میزان دقت شبکه در تشخیص صحیح موقعیت عمودی عیب با داده‌های شبیه‌سازی (شکل سمت چپ) و با افزودن سه درصد خطای تصادفی به داده‌های شبیه‌سازی (شکل سمت راست)

Fig. 12. Network accuracy in correctly detecting the vertical position of the fault with simulation data (left Fig.) and by adding 3% random error to the simulation data (right Fig.)

منابع

[1] Z. Tang, A. Cheng, J.D. Achenbach, An ultrasonic technique to detect nonlinear behavior related to degradation of adhesive bonds, in: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Springer, 1998, pp. 1347-1354.

[2] A. Pilarski, J.L. Rose, A transverse-wave ultrasonic oblique-incidence technique for interfacial weakness detection in adhesive bonds, Journal of Applied Physics, 63(2) (1988) 300-307.

[3] V. Kinra, V. Dayal, A new technique for ultrasonic-nondestructive evaluation of thin specimens, Experimental Mechanics, 28(3) (1988) 288-297.

[4] W. Kern, C. Spier, E. Hanneman, T. Miller, M. Matzner, T. Grogan, Neural cell adhesion molecule-positive peripheral T-cell lymphoma, (2011).

[5] A. Moidu, A. Sinclair, J. Spelt, A new ultrasonic technique for the interfacial characterization of adhesive joints, in: 1996 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings, IEEE, 1996, pp. 757-760.

[6] C. Brotherhood, B. Drinkwater, S. Dixon, The detectability of kissing bonds in adhesive joints using ultrasonic techniques, Ultrasonics, 41(7) (2003) 521-529.

[7] H. Lamb, On waves in an elastic plate, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing papers of a mathematical and physical character, 93(648) (1917) 114-128.

[8] P. Cawley, D. Alleyne, The use of Lamb waves for the long range inspection of large structures, Ultrasonics, 34(2-5) (1996) 287-290.

[9] J.L. Rose, Dispersion curves in guided wave testing, Materials Evaluation, 61(1) (2003) 20-22.

[10] A. Pilarski, J.L. Rose, Lamb wave mode selection concepts for interfacial weakness analysis, Journal of nondestructive evaluation, 11(3-4) (1992) 237-249.

[11] L. Singher, Y. Segal, E. Segal, J. Shamir, Considerations in bond strength evaluation by ultrasonic guided waves, The Journal of the Acoustical Society of America, 96(4) (1994) 2497-2505.

[12] V. Mustafa, A. Chahbaz, D.R. Hay, M. Brassard, S. Dubois, Imaging of disbond in adhesive joints with Lamb waves, in: Nondestructive Evaluation of Materials and Composites, International Society for Optics and Photonics, 1996, pp. 87-97.

[13] M.J. Lowe, D.N. Alleyne, P. Cawley, Defect detection in pipes using guided waves, Ultrasonics, 36(1-5) (1998) 147-154.

[14] M. Lowe, R. Challis, C. Chan, The transmission of Lamb waves across adhesively bonded lap joints, The Journal of the Acoustical Society of America, 107(3) (2000) 1333-1345.

[15] F.L. di Scalea, M. Bonomo, D. Tuzzeo, Ultrasonic guided wave inspection of bonded lap joints: Noncontact method and photoelastic visualization, Journal of Research in Nondestructive Evaluation, 13(3) (2001) 153-171.

[16] P.K. Puthillath, H. Kannajosyula, C.J. Lissenden, J.L. Rose, ULTRASONIC GUIDED WAVE INSPECTION OF ADHESIVE JOINTS: A PARAMETRIC STUDY FOR A STEP-LAP JOINT, in: AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics, 2009, pp. 1127-1133.

[17] B. Le Crom, M. Castaings, Shear horizontal guided wave modes to infer the shear stiffness of adhesive bond layers, The Journal of the Acoustical Society of America, 127(4) (2010) 2220-2230.

[18] C.P. Todd, R.E. Challis, Quantitative classification of adhesive bondline dimensions using Lamb waves and artificial neural networks, IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 46(1) (1999) 167-181.

[19] U. Bork, R. Challis, Non-destructive evaluation of the adhesive fillet size in a T-peel joint using ultrasonic Lamb waves and a linear network for data discrimination, Measurement Science and Technology, 6(1) (1995) 72.

[20] M. Rautela, S. Gopalakrishnan, Ultrasonic guided wave based structural damage detection and localization using model assisted convolutional and recurrent neural networks, Expert Systems with Applications, 167 (2021) 114189.

[21] Y. Liu, Choose the best element size to yield accurate FEA results while reduce FE model's complexity, (2013).

[22] H. Salehi, R. Burgueño, Pattern recognition framework using asynchronous discrete binary data for condition and damage assessment in plate-like structures, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 30(8) (2019) 1200-1215.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Rastegar , M. Rajabi, S. D. N. Tanha, Use of Artificial Intelligence to Identify Adhesive Joints Defects by Using Ultrasonic, Amirkabir J. Mech Eng., 54(2) (2022) 377-390.

DOI: 10.22060/mej.2021.20233.7198