



## 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.

### 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

**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 صورت گرفته 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 بهیودیافته و ویژگی‌های انتخاب شده جهت تفکیک عیوب این‌گونه از اتصالات است.

### ۱- مقدمه

روش بازرسی انتشار عمودی<sup>۱</sup>، 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. از آنجاکه لایه چسب معمولاً بسیار نازک است، نیاز به یک مبدل<sup>۲</sup> با وضوح بالا برای ایجاد تمایز بین فصل مشترک‌ها در داخل منطقه چسب است [۱].

پلارسکی<sup>۳</sup> و رز [۲] امواج حجمی را به شکل مورب به‌جای امواج طولی حجمی در انتشار نرمال جهت بررسی وضعیت چسبندگی<sup>۴</sup>، منتشر نموده‌اند. فاکتورهای بازتاب برای هر دو نوع انتشار طولی و عرضی بررسی شده است.

- 1 Normal incidence
- 2 Transducer
- 3 Pilarski
- 4 Rose
- 5 Adhesion

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<sup>۵</sup> و دایال [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 فوریه<sup>۶</sup> سریع<sup>۷</sup> 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<sup>۸</sup> و همکاران [۴] این روش را برای ساختار چندلایه‌ای گسترش دادند و انتقال را از طریق پنج اتصال چسبی متفاوت بررسی کرده‌اند. مشخص

- 6 Kinra
- 7 Dayal
- 8 Fast fourier transfer
- 9 Hanneman

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



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

موبدو<sup>۱</sup> 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 مورد مطالعه قرار گرفته است.

برادر هود<sup>۲</sup> و همکاران [۶] به بررسی قابلیت آشکارسازی یک باند بوسیدن خشک<sup>۳</sup> 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 اولین بار توسط لمب [۷] آنالیز شده و به نام موج لمب شناخته می‌شود.

کالی<sup>۴</sup> و الین<sup>۵</sup> [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 آزمون 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

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

تغییر منحنی دیسپرز و توزیع جابه‌جایی باشد. با استفاده از روش ماتریس کلی، منحنی در دیسپرز برای شرایط فصل مشترک‌های مختلف، محاسبه و مقایسه شده است. باید اشاره نمود که انتخاب مد نباید صرفاً به منحنی دیسپرز بستگی داشته باشد چراکه توزیع جابه‌جایی می‌تواند به طور قابل توجهی بدون تغییر زیاد در سرعت فاز تغییر نماید، بنابراین توزیع جابه‌جایی و توان، در مقطع مورد بررسی قرار گرفت و معیاری از ترکیب جابه‌جایی و جریان توان در همسایگی فصل مشترک ارائه گردید.

سینگر<sup>۶</sup> 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<sup>۷</sup> و همکاران [۱۲] از مد s. جهت بازرسی شرایط اتصالات لب به لب<sup>۸</sup> و تسمه پارگی<sup>۹</sup> 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. باین‌حال، برای مورد تسمه پارگی، اتصال خوب مرتبط با دامنه پایین است چرا که انرژی در تقویت‌کننده‌ها<sup>۱۰</sup> نشت می‌کند و اتصال بد مرتبط با دامنه بالا می‌باشد چراکه انرژی در پوسته نگه داشته می‌شود.

لو<sup>۱۱</sup> 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 نقایص 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 اتصالاتی مورد مطالعه قرار داده است. سه مد s. و a<sub>1</sub> و a<sub>2</sub> در نظر گرفته شده و ضرایب انتقالی از نتایج شبیه‌سازی محاسبه گردیده‌اند. لازاندا دی اسکالا<sup>۱۲</sup> و همکاران [۱۵] شرایط مختلف اتصالات، یعنی اتصال سالم چسب، عدم چسبندگی و چسبندگی ضعیف را با استفاده از هر دو مد a<sub>1</sub> و s. در فرکانس‌های مختلف مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج نشان

داد که عدم چسبندگی میرایی شدیدی در سیگنال‌های دریافتی ایجاد می‌کند،

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

مسئله معکوس استفاده کردند و یک استراژی 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. به عبارتی دیگر هدف یافتن شاخصی مناسب از سیگنال دریافتی با به کار بردن تنها یک حسگر است تا بتوان به کمک این شاخص ویژگی‌های عیوب موجود در چسب را استخراج نمود. برای این منظور ابتدا مدل سازی‌های عددی به صورت سه بعدی 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 به صورت 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 به صورت بسته موج در ماده حرکت می‌کنند سرعت گروه می‌نامند و با  $c_g$  نمایش داده می‌شود.

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

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

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

### ۲- مدل سازی 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

اما برای چسبندگی ضعیف،  $s$  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 در زمانی که موج از یک محیط چسبیده به محیط دیگر نفوذ می‌کند، خواهد شد.

مطالعه پارامتری برای اتصالات پله‌ای توسط پوژیلایژ<sup>۱</sup> 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  $s$  می‌شود. حضور عیوب باعث افزایش کمینه طیف مدهای مد  $s_1$  و مد  $s_2$  می‌شود.

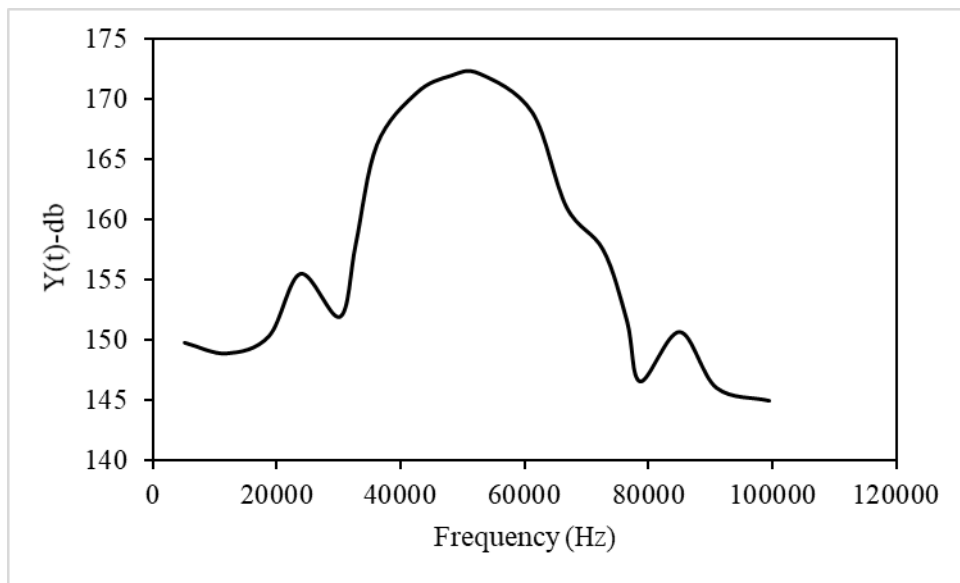
لی کروم<sup>۲</sup> و کستینگز [۱۷] از مد موج افقی برشی برای پی بردن به وضعیت چسبندگی استفاده نموده است. مدول‌های برشی لایه چسب در زمان پخت مختلف را می‌توان با مقادیر سرعت فاز مد برش افقی مشاهده نمود.

دالتون<sup>۳</sup> 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<sup>۴</sup> و چالیس<sup>۵</sup> [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 آموزش داده شده است.

رایوتالا<sup>۶</sup> و گپالاکرشنان [۲۰] با استفاده از شبکه‌های یادگیری عمیق مانند شبکه‌های عصبی کانولوشن و تکرار شونده برای تقریب عددی حل

- 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

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 در زمانی که هنوز به صورت 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 به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده 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.

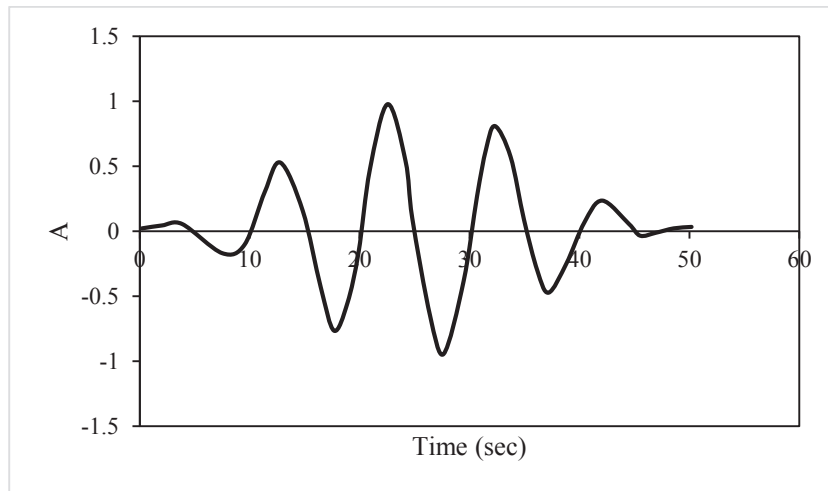
#### ۲-۳- پارامترهای شبیه‌سازی المان محدود

جهت شبیه‌سازی صحیح این اتصال در ابتدا باید تعدادی از پارامترهای

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

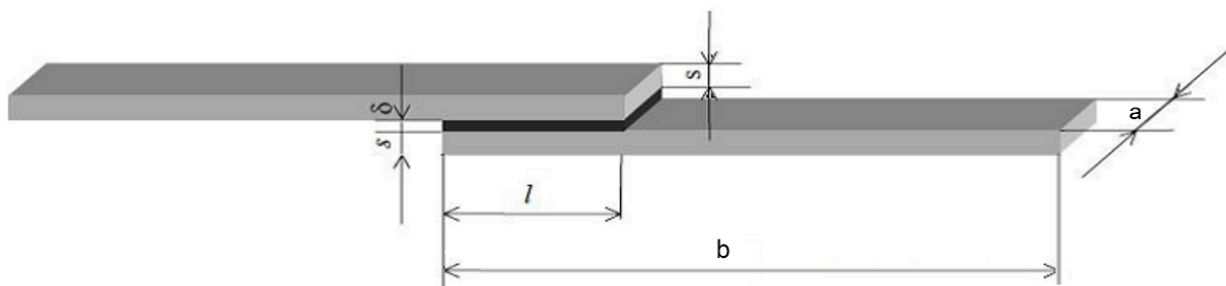
$$A(t) = \frac{1}{2} \times \sin(2\pi ft) \times \left( 1 - \cos\left(\frac{2\pi f}{N} t\right) \right) \quad (3)$$

در معادله (۳)،  $f$  فرکانس میانی تحریک برحسب هرترتز و  $N$  تعداد سیکل‌های سیگنال تون برست است. تبدیل فوریه‌ی سریع سیگنال تولیدشده به کمک معادله (۳) به ازای  $(N = 5)$  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



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 به کاررفته در شبیه‌سازی المان محدود

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

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

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 به صورت 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 به صورت خودکار چنین است:

$$\Delta t \approx \frac{l_{e_{\min}}}{C_L} \quad (4)$$

که  $l_{e_{\min}}$  کوچک‌ترین المان در مدل و  $C_L$  سرعت موج طولی است. این ارزیابی تقریبی است؛ بنابراین ارزیابی محافظه کارانه به صورت زیر است:

$$\Delta t \approx \frac{l_{e_{\min}}}{\sqrt{2}C_L} \quad (5)$$

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 قابل حل 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:

$$\Delta t = \frac{1}{20f_{\max}} \quad (6)$$

### ۲-۳-۲- اندازه المان

اندازه المان باید به گونه‌ای انتخاب شود که موج منتشرشده به دقت دیده شود. مرجع [۲۱] تعداد المان به ازای هر طول موج را ۲۰ عدد پیشنهاد کرده است. در نهایت می‌توان از معادله (۷) برای محاسبه‌ی طول المان استفاده

$$l_e = \frac{\lambda_{\min}}{20} \quad (7)$$

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

$$l_e = \frac{\lambda_{\min}}{20} \approx \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{20f_{\max}} \quad (8)$$

که  $E$  مدول یانگ و  $\rho$  چگالی قطعه می‌باشد مقدار طول هر المان باید کمتر از ۰/۰۱ میلی‌متر در نظر گرفته شود.

### 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  $S_1$  می‌باشد. جهت ایجاد مد  $S_1$  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 نشان داده شده 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  $50 \times 50$  میلی‌متر و در سه ضخامت متفاوت مدل‌سازی شده است. همچنین عیب در سه اندازه مختلف در نه موقعیت ایجادشده که در مجموع سه نمونه سالم و ۸۱ نمونه معیوب مدل‌سازی شده‌اند. مقادیر و تعداد متغیرها در این شبیه‌سازی به دلخواه و صرفاً جهت نشان دادن حساسیت سیگنال دریافتی به تغییر ضخامت چسب



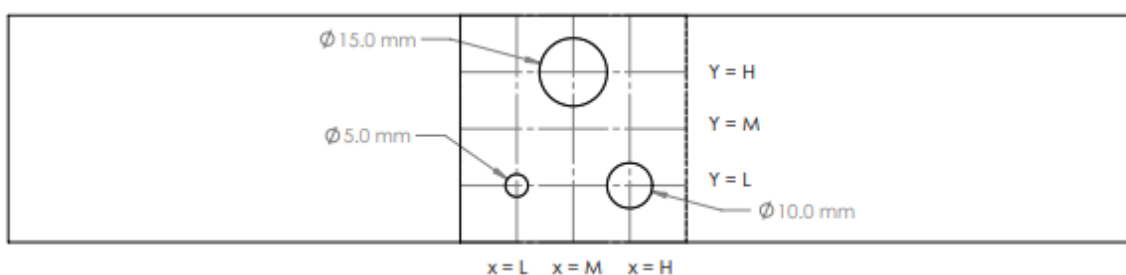
شکل ۴. اعمال جابه‌جایی بر ورق آلومینیومی و تحریک آن

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

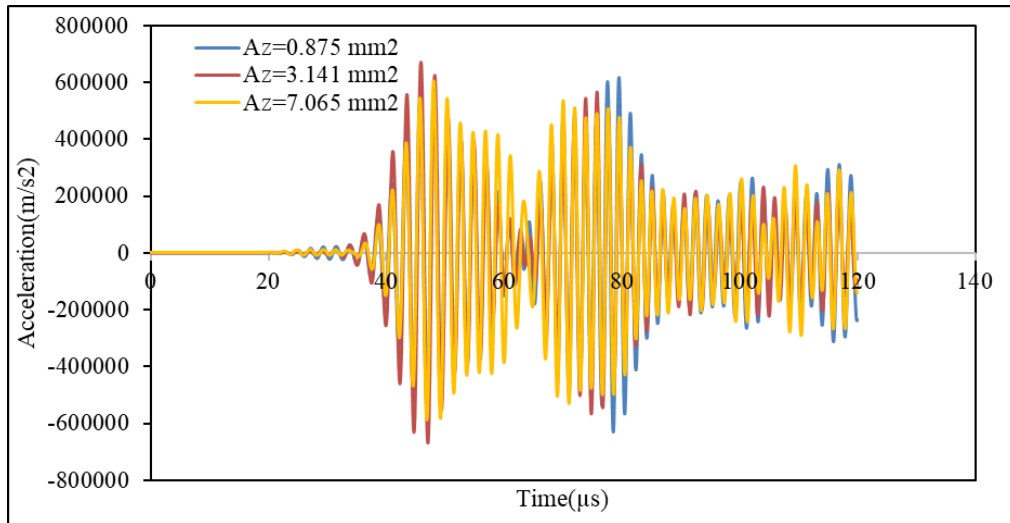


شکل ۵. شماتیکی از عیوب ایجاد شده در چسب

Fig. 5. Schematic of defects created in the adhesive

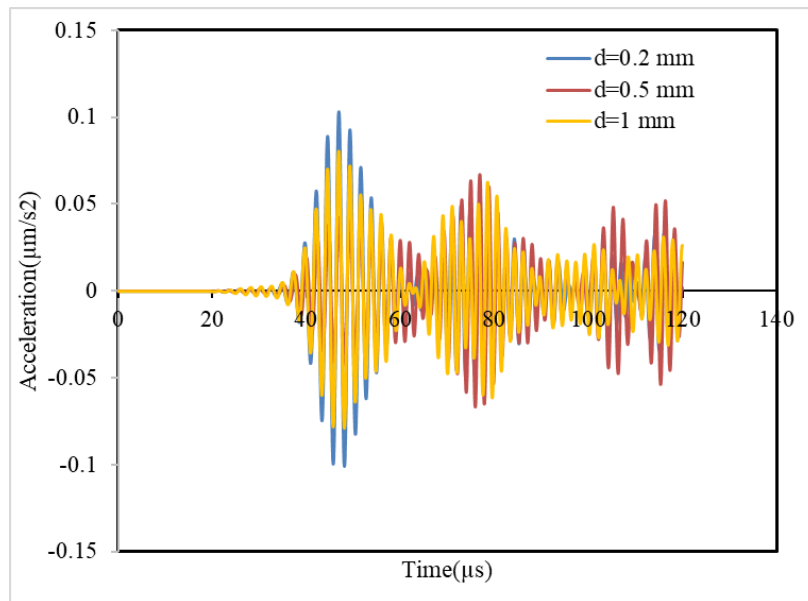
نشان داده شده‌اند. همان گونه که مشاهده می‌شود با تغییر مساحت عیب سیگنال‌های دریافتی توسط حسگر نیز تغییر می‌کند. در شکل ۷ سه نمونه از سیگنال‌های دریافتی در سه ضخامت متفاوت نشان داده شده‌اند. همان گونه که مشاهده می‌شود با تغییر ضخامت چسب، سیگنال‌های دریافتی توسط حسگر نیز تغییر می‌کند.

و وجود عیب در موقعیت‌های مختلف چسب می‌باشد. این عیوب به صورت شماتیک در شکل ۵ نشان داده شده است. اندازه‌های متغیر اشاره شده هر عیب مربوط به پارامترهای آنها هستند. مقادیر به صورت میلی‌متر می‌باشند که در جدول ۲ نشان داده شده است. در شکل ۶ سه نمونه از سیگنال‌های دریافتی در سه مساحت متفاوت



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

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

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 دو طبقه متفاوت (تصمیم) تا حد ممکن از یکدیگر دور باشند.

در این روش با استفاده از نوعی میانگین‌گیری از مقادیر ویژگی‌ها و فاصله بین مراکز قرارگیری آنها در صفحه، به هر ویژگی یک امتیاز اختصاص داده می‌شود. در نتیجه 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 از نظر ضخامت چسب، مساحت عیب و موقعیت عیب ما برای الگوریتم تعیین ویژگی میزان آستانه ۰/۹۵ را در نظر گرفته‌ایم، یعنی ویژگی‌هایی قابل قبول می‌باشند که میزان امتیاز نرمال آنها بیشتر از مقدار ۰/۹۵ است.

به کمک روش تکامل فاصله بهبودیافته<sup>۱</sup> و الگوریتم بیان شده امتیاز ویژگی‌های معرفی شده استخراج گردیده و در جدول ۳ نشان داده شده 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 مورد استفاده قرار می‌گیرد و مدل‌سازی را انجام می‌دهد. شبکه

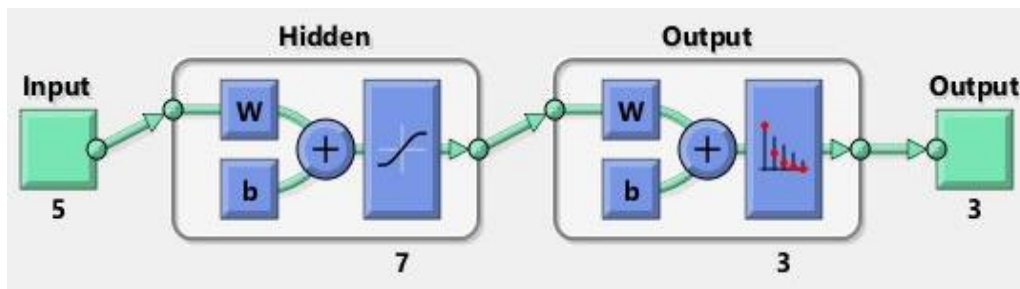
عصبی قبل از تفسیر نتایج نیاز به آموزش دارد. در این پژوهش ابتدا ۷۰ درصد از داده‌ها برای مرحله آموزشی، ۱۵ درصد آنها جهت اعتبارسنجی که

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 به صورت تصادفی و به صورت 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 یک لایه 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

و منفی) در داده‌های اندازه‌گیری در نظر گرفته می‌شود، هر دو نمودار جهت محک بهتر در کنار هم رسم شده‌اند. شبکه عصبی آموزش داده شده در شکل ۹ نشان داده شده است. نمودار سمت چپ، داده‌های اصلی و نمودار سمت راست داده‌های همراه با خطای مصنوعی هستند.

همان گونه که پیش‌ازین 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 میلی‌متر 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 یک لایه ورودی ۵ نورون ورودی، یک لایه میانی با ۸ نورون میانی و یک لایه خروجی با ۳ نورون خروجی تشکیل شده است در این روند میانگین توان دوم خطا برای داده‌های بدون خطا با مقدار ۰/۰۳۵ به‌دست آمده است. محک شبکه عصبی آموزش داده شده با تابع trainbr در شکل ۱۰ نشان داده شده 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.

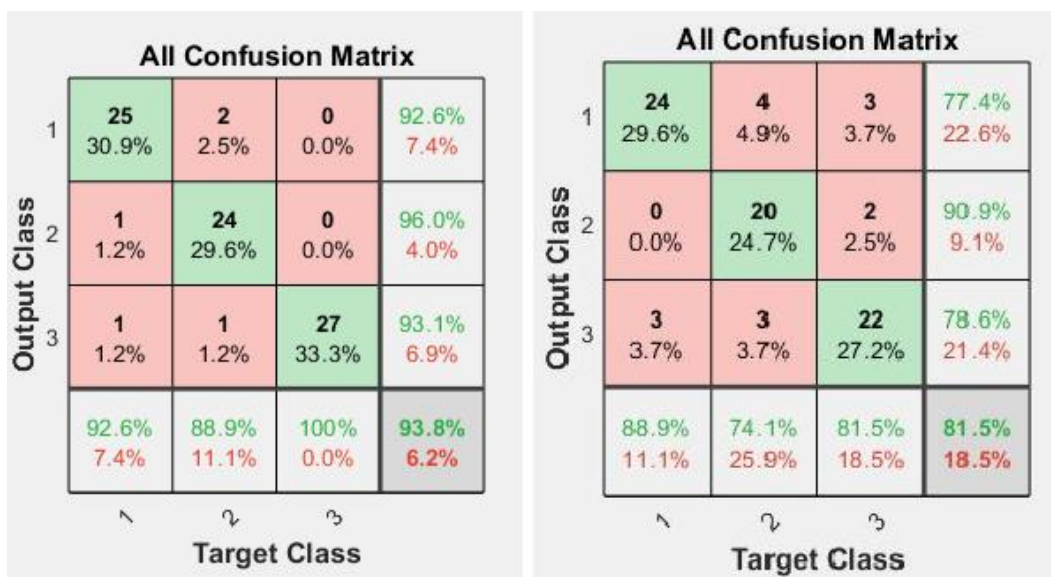
برای تشخیص موقعیت عیب از دو شبکه عصبی جداگانه استفاده

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 به‌دست آمده در هر بخش به‌عنوان ورودی آن بخش استفاده شده تا بتوان بهترین تفکیک را به کمک شبکه عصبی پیاده‌سازی کرد.

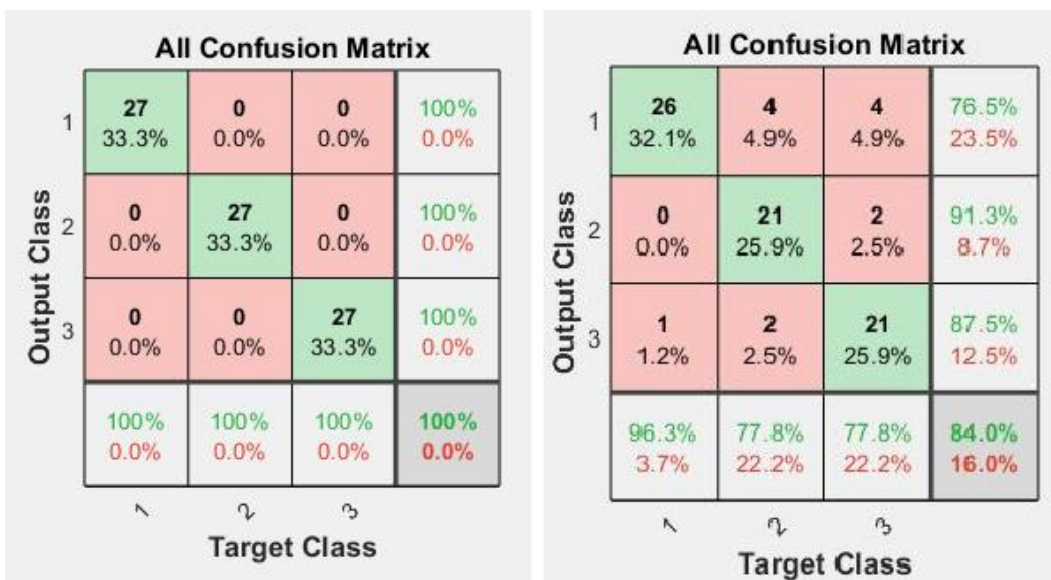
۴- نتایج شبکه عصبی برای امواج به‌دست آمده از شبیه‌سازی بهترین ساختار شبکه عصبی در این تحقیق از یک لایه ورودی ۵ نورون ورودی، یک لایه میانی با ۷ نورون میانی و یک لایه خروجی با ۳ نورون خروجی تشکیل شده است در این روند میانگین توان دوم خطا با مقدار ۰/۰۲۰۶ به‌دست آمده است.

در این مقاله، جهت ارزیابی روش مذکور، در هر مرحله داده‌های اندازه‌گیری که در روند تحلیل بکار می‌روند، ۳ درصد خطای اتفاقی (مثبت



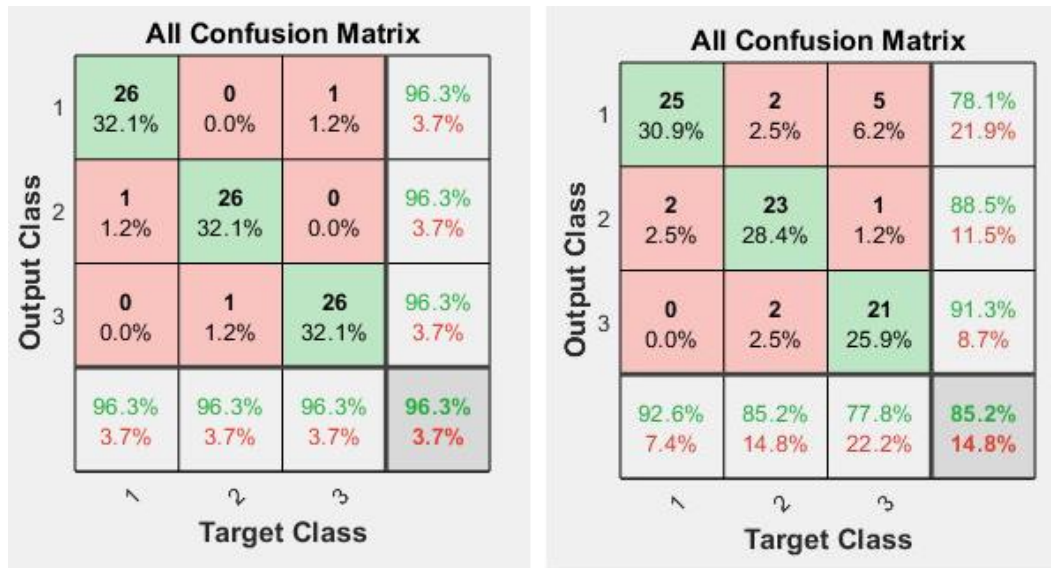
شکل ۹. میزان دقت شبکه در تشخیص صحیح ضخامت چسب با داده‌های شبیه‌سازی (شکل سمت چپ) و با افزودن سه درصد خطای تصادفی به داده‌های شبیه‌سازی (شکل سمت راست)

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 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. )

نیاز به استفاده از شبکه عصبی دیده‌شد. پیاده‌سازی شبکه عصبی منجر به عملکردی بهینه در دسته‌بندی نمونه‌های شبیه‌سازی شده 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) در نظر 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 به صورت 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 استفاده شده در اتصال میان دو ورق را در عملکرد روش پیشنهاد شده در این مقاله مورد بررسی قرارداد.

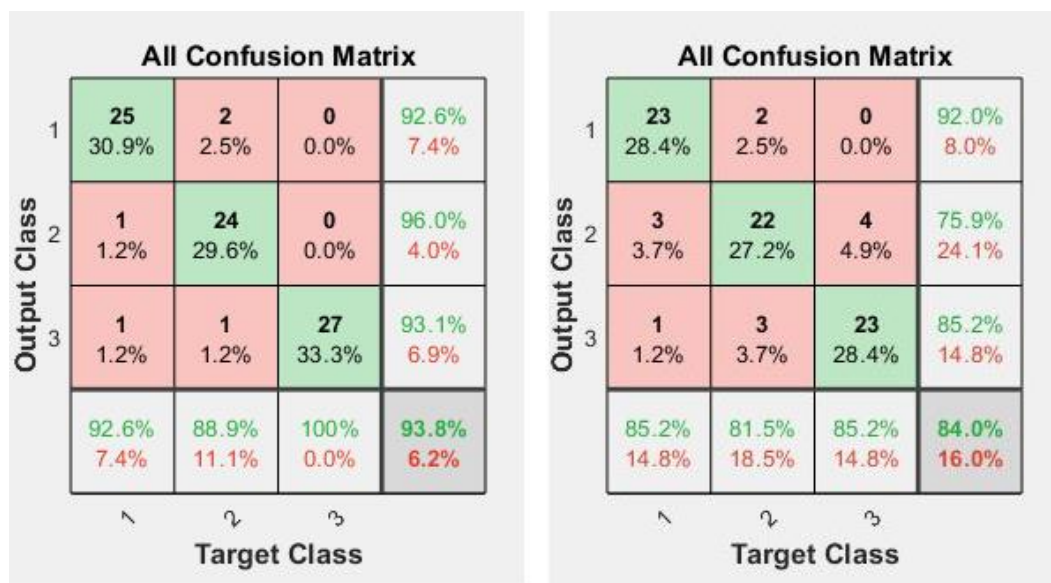
می‌شود، یکی جهت تشخیص موقعیت در محور افقی و دیگری جهت تشخیص موقعیت در محور عمودی.

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

#### ۴- جمع بندی و نتیجه گیری

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 آزمون و خطا تابع trainbr بدست آمد. در نرم‌افزار آباکوس<sup>۱</sup> مدل سه بعدی 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

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. )

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.

## 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.



- 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.
- [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

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

