مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1396، دوره 17، شماره 5، ص‌ص 221-231

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

عیب‌یابی ورق چند لایه کامپوزیتی با آسیب جدایی بین‌لایه‌ای با استفاده از آموزش شبکه عصبی برمبنای پاسخ ارتعاشات آزاد

محمد جواد محمودی[1*]، ارازمحمد فخری اینچه برون[2]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

* تهران، صندوق پستی 167651719، mj_mahmoudi@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 05 دی 1395

پذیرش: 25 اسفند 1395

ارائه در سایت: 13 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

ورق کامپوزیتی چندلایه

آسیب جدایی بین‌لایه‌ای

عیب‌یابی بر مبنای آنالیز مودال

شبکه عصبی پس انتشار خطا

چکیده

در این پژوهش از شبکه عصبی پس انتشار خطا برای عیب‌یابی ورق کامپوزیتی چندلایه با جدایی بین‌لایه‌ای استفاده می‌شود. نحوه عیب‌یابی به این صورت است که ابتدا تحلیل ارتعاشات آزاد ورق کامپوزیتی بر اساس روش عددی اجزای محدود انجام می‌گیرد و فرکانس‌های طبیعی در مودهای خاص به ازای مدل‌های مختلفی از آسیب جدایی بین‌لایه‌ای (اندازه، هندسه و موقعیت منطقه با جدایی بین‌لایه‌ای) بدست می‌آید و سپس فرکانس‌های طبیعی استخراجی از مدل به عنوان ورودی و پارامترهای اندازه، هندسه و موقعیت نیز به عنوان خروجی شبکه عصبی درنظر گرفته می‌شوند. ورق کامپوزیتی 8 لایه، بر اساس تئوری سه‌بعدی الاستیسیته و با درنظر گرفتن المان‌های شش وجهی آجری مدل می‌شود لذا در مدل‌سازی ورق کامپوزیتی تاثیر تغییر شکل‌های برشی عرضی درنظر گرفته می‌شود. به‌دلیل پیچیدگی فرایند حاکم بر مسئله ورق کامپوزیتی با جدایی بین‌لایه‌ای از قابلیت‌های نرم‌افزار آباکوس برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. همچنین نتایج عددی حاصل از روش اجزای محدود با داده‌های عددی و آزمایشگاهی در دسترس مورد مقایسه و اعتبارسنجی قرار می‌گیرد. از دو روش آموزش لونبرگ–مارکوآرت و پس انتشار خطای انعطاف‌پذیر برای آموزش شبکه عصبی و مقایسه پاسخ‌ها استفاده می‌شود. نتایج پیش‌بینی با روش آموزش لونبرگ–مارکوآرت تطابق بسیار خوبی با مقادیر بدست آمده از روش اجزای محدود دارد. بعد از آموزش شبکه عصبی، از تعمیم این مدل برای پیش‌بینی و عیب‌یابی آسیب در ورق کامپوزیتی استفاده می‌شود.

Fault detection of laminated composite plate with delamination damage using neural network training based on the free vibration response

Mohammad Javad Mahmoodi*, Araz Mohammad Fakhri Inchehborun

Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University,Tehran, Iran

* P.O.B. 167651719, Tehran, Iran, mj_mahmoudi@sbu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 25 December 2016
Accepted 15 March 2017
Available Online 03 May 2017

Keywords:
Laminated composite plate
Delamination
Fault detection based on modal analysis
Error back-propagation neural network

ABSTRACT

In this study, error back-propagation neural network is used for fault detection of composite plate with delamination damage. At the first step of the fault detection process, a free vibration analysis of laminated composite plates is performed based on numerical finite element method and the natural frequencies of individual modes is obtained for different delamination models (size, geometry and location of the delamination region). Then natural frequencies extracted from the model are considered as the input parameter and the size, geometry and location of the delamination region are also considered as the output parameters of the neural network. 8-layers composite plate is modeled based on the three-dimensional elasticity theory and considering hexagonal brick elements. So, transverse shear deformations effect is taken into account in the modeling of composite plate. ABAQUS software capabilities are used for modeling because of the complexity of process governing on the composite plate with delamination. The numerical results obtained by the finite element method are compared and validated with available numerical and experimental data. Two training methods including Levenberg - Marquardt and Error propagation flexible algorithm are used to train the neural network and compare responses. Predicted results by Levenberg – Marquardt training method are in very good agreement with the values obtained by the finite element method. After training the neural network, the model generalization is used for the damage prediction and detection in composite plate.

1- مقدمه

مود اصلی آسیب[1] برای کامپوزیت‌های چندلایه، جدایی در امتداد فصل مشترک لایه‌ها می‌باشد که اصطلاحا جدایی بین‌لایه‌ای[2] نامیده می‌شود. این نوع آسیب با تنش‌های بین لایه‌ای تحریک شده و به‌دلیل تغییر پارامترهایی

[1] Damage

[2] Delamination

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. J. Mahmoodi, A. M. Fakhri Inchehborun, Fault detection of laminated composite plate with delamination damage using neural network training based on the free vibration response, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 221-231, 2017 (in Persian)

همچون تاثیر گوشه و لبه آزاد[1]، ناپیوستگی‌های ساختاری، آسیب‌های موضعی در حین ساخت و در شرایط کاری مثل ضربه، سوراخ‌کاری در هنگام ساخت، تغییرات رطوبت و درجه حرارت و مکانیزم‌های داخلی شکست همچون ترک‌های زمینه[2]، رشد می‌کند [1]. این عیب می‌تواند باعث تغییر در خصوصیات فیزیکی ماده مرکب شده، معمولاً روی توزیع جرم اثری نمی‌گذارد، اما سفتی ساختاری را کاهش داده و منجربه تغییر پارامترهای مودال از جمله کاهش فرکانس طبیعی آن می‌شود که نهایتاً این امر کاهش عمر سازه را به همراه دارد.

محققان زیادی به بررسی تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی پیرامون پدیده جدایی بین‌لایه‌ای با درنظر گرفتن پارامترهای آسیب تحت شرایط مختلف بارگذاری پرداختند [2-7]. در سال 2003 لئو و همکارانش از المان ورق و تئوری لایر وایز[3] برای مدل‌سازی جدایی بین‌لایه‌ای در ورق کامپوزیتی استفاده کردند. این مدل به‌صورت دو بعدی برای المان ورق تعریف شد [8].

محققان بسیاری با استفاده از تکنیک‌های مبتنی بر ارتعاشات و تست‌های غیرمخرب، به شناسایی آسیب در ورق‌های کامپوزیتی چندلایه پرداخته‌اند [9-15]. بعدها گابلرب تغییر پارامترهای مودال تیر با جدایی بین-لایه‌ای را برای شرایط مرزی مختلف بررسی نمود [16]. النفائی در سال 2009 به کمک روش المان محدود مدلی را برای آسیب جدایی بین‌لایه‌ای در چندلایه‌های کامپوزیتی ارائه کرد [17]. هاریسون و باتلر از دو روش بهینه‌کننده کاهش گرادیان و الگوریتم ژنتیک برای موقعیت‌یابی تیرهای کامپوزیتی استفاده نمودند [18]. ناگ و همکارانش جدایی بین‌لایه‌ای را با استفاده از الگوریتم ژنتیک شناسایی کردند [19]. اکافور با درنظر گرفتن تاثیر ضریب پواسون و تغییر شکل برشی عرضی فرکانس‌های طبیعی تیر و اندازه و موقعیت جدایی بین‌لایه‌ای را تخمین زد [20]. ایسلام و کرایگ از ترکیب شبکه‌های عصبی و سنسورهای پیزوالکتریک برای عیب‌یابی آسیب در سازه‌های کامپوزیتی استفاده کردند [21]. ژنگ به کمک روش المان محدود و با به‌کارگیری الگوریتم فازی به پیش‌بینی آسیب در تیر کامپوزیتی چندلایه پرداخت [22]. در این میان، شبکه عصبی مصنوعی یک سیستم پردازش اطلاعات است که الهام گرفته شده از شبکه عصبی طبیعی و ساختار مغز انسان می‌باشد. به عبارتی این شبکه‌ها تعمیم یافته مدل‌های ریاضی تشخیص انسان براساس زیست‌شناسی عصبی هستند. شبکه‌های عصبی مصنوعی با پردازش داده‌ها، دانش یا قانون نهفته در ورای داده‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کنند و لذا روشی قوی برای شناخت و مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده می‌باشند. در سیستم‌هایی که ارتباط واضح و ساده‌ای بین پارامترهای حاکم بر مسئله وجود ندارد، شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مناسب جهت شناسایی و پیش بینی پارامترها عمل کند. امروزه ساختارها و الگوریتم‌های بسیاری وجود دارند که برای مسائل موجود در شبکه‌های عصبی به‌کار می‌روند [23]. شبکه‌های عصبی محاسبات کمتری نسبت به سایر الگوریتم‌های عیب‌یابی به‌کار می‌برند و برای عیب‌یابی سازه‌ای بسیار مناسب هستند [23]. شبکه‌های عصبی به علت سه ویژگی مهم شامل توانایی نگاشت کلی، مقاومت در برابر داده‌های نویزی و توانایی یادگیری با آموزش نظارت شده برای عیب‌یابی استفاده می‌شوند [23].

در مقاله حاضر برخلاف مدل‌هایی که برای تحلیل آسیب در تیرها به‌صورت دو بعدی استفاده شده است، از مدل کاملاً سه‌بعدی استفاده می‌شود. با استفاده از این مدل، پدیده جدایی بین‌لایه‌ای در ورق‌های کامپوزیتی و تاثیر عواملی چون اندازه، هندسه و موقعیت منطقه با جدایی بین‌لایه‌ای روی فرکانس‌های طبیعی توصیف می‌شود. به‌دلیل پیچیدگی فرایند حاکم بر مسئله ورق کامپوزیتی با جدایی بین‌لایه‌ای از قابلیت‌های نرم‌افزار آباکوس برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. همچنین در مناطق با جدایی بین‌لایه‌ای جهت جلوگیری از نفوذپذیری لایه‌ها، از المان‌های فنر مجازی موجود در نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌شود. ورق کامپوزیتی 8 لایه، براساس تئوری سه‌بعدی الاستیسیته و با درنظر گرفتن المان‌های شش وجهی آجری مدل می‌شود. همچنین تاثیر تغییر شکل برشی عرضی در مدل‌سازی ورق کامپوزیتی لحاظ شده است. در این پژوهش از شبکه عصبی پس انتشار خطا برای عیب‌یابی ورق کامپوزیتی چندلایه با آسیب جدایی بین‌لایه‌ای استفاده می‌شود. ابتدا تحلیل ارتعاشات آزاد ورق کامپوزیتی براساس روش عددی اجزای محدود انجام می‌گیرد و فرکانس‌های طبیعی در مودهای خاص به ازای مدل‌های مختلفی از آسیب جدایی بین‌لایه‌ای (اندازه و موقعیت منطقه با جدایی بین‌لایه‌ای) به‌دست می‌آید و سپس فرکانس‌های طبیعی استخراجی از مدل به عنوان ورودی و پارامترهای اندازه و موقعیت نیز به‌عنوان خروجی شبکه عصبی درنظر گرفته می‌شوند. از دو روش آموزش لونبرگ–مارکوآرت و پس انتشار خطای انعطاف‌پذیر برای آموزش شبکه عصبی و مقایسه پاسخ‌ها استفاده می‌شود.

2- مدل‌سازی برمبنای روش ناحیه چسبناک

یکی از روش‌هایی که برای پیش‌بینی و شروع و رشد جدایی بین‌لایه‌ای به‌کار می‌رود، المان فصل مشترک[4] یا المان ناحیه چسبناک[5] می‌باشد [24]. امروزه از این روش در نرم‌افزارهای اجزاء محدود به‌ویژه آباکوس[6] استفاده می‌شود. این المان‌ها به صورت مدلی با ضخامت بسیارکم و نزدیک به صفر در بین‌لایه‌های جدا شده درنظرگرفته می‌شود. "شکل 1" شماتیکی از المان چسبناک را بین‌لایه‌های جداشده از یک کامپوزیت نشان می‌دهد.

جابه‌جایی گره‌ها تحت بارگذاری‌های اعمالی به مولفه‌های نرمال و برشی تقسیم می‌شود. توصیف رفتار جدایی بین‌لایه‌ای با استفاده از این المان‌ها مبتنی بر مودهای شکست و معیارهای انرژی می‌باشد [24]. برای بررسی این رفتار در نرم‌افزار آباکوس می‌توان از قانون جدایی ترکشن[7] استفاده نمود که ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی جدایی بین‌لایه‌ای و پیش‌بینی شروع و رشد آن به کمک معیارهای خرابی می‌باشد. در اصل مدل جدایی ترکشن در نرم‌افزار آباکوس به‌صورت الاستیک خطی فرض می‌شود، که برای بیان آن تانسور الاستیک K° تعریف می‌شود که تنش‌های اسمی (بردارترکشن)، $\tau^{\mathrm{T}} = (\tau_n, \tau_s, \tau_t)$ را به کرنش‌های اسمی (بردار جابجایی بازشدگی)، $\Delta^{\mathrm{T}} = (\delta_n, \delta_s, \delta_t)$ که در امتداد سطح میانی است. "شکل 2" نمودار دو

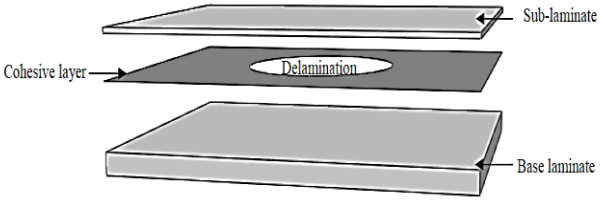

Fig. 1 A schematic of the delamination model with cohesive element [24]

شکل 1 شماتیکی از مدل جدایی بین‌لایه‌ای به‌همراه المان چسبناک [24]

[1] Free edge effect
[2] Matrix cracking
[3] Layerwise
[4] Interface element
[5] Cohesive zone element
[6] Abaqus
[7] Traction separation law

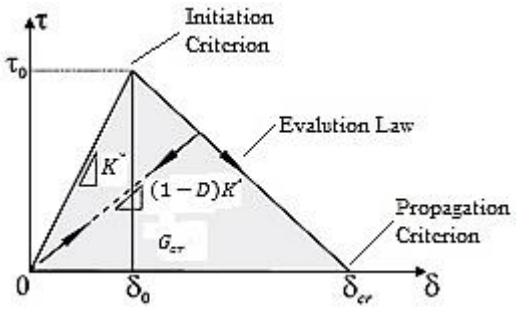

Fig. 2 Bilinear traction – separation constitutive law [25]

شکل 2 نمودار دوخطی قانون جدایی ترکشن [25]

خطی ساده قانون جدایی ترکشن با تعریف عباراتی از ترکشن مؤثر τ و جابجایی بازشدگی مؤثر δ را نشان می دهد [25].

بدیهی است که رابطه‌ی بین اثرات ترکشن و اثرات جابجایی بازشدگی توسط سه پارامتر تعریف می‌شود، که دو عدد از آن‌ها منحصراً مربوط به شکست است. این پارامترها شامل، حداکثر ترکشن (استحکام موضعی مواد، τ_0)، مشخصه‌ای از جابجایی بازشدگی بحرانی در شکست (δ_{cr}) و انرژی مورد نیاز برای باز شدن ترک (مساحت زیر نمودار ترکشن-جابجایی، G_{cr}) هستند که در "شکل 2" نشان داده شده است. پارامتر D معیار خرابی در چارچوب مکانیک آسیب پیوسته است که در محدوده‌ی $0 \le D \le 1$ در نظر گرفته می‌شود. معیار شکست ماکزیمم کرنش اسمی برای شروع آسیب در المان چسبنده، با حداکثر مقدار کرنش اسمی $\varepsilon_t = 9 \times 10^{-7}$ به‌عنوان معیار خرابی انتخاب می‌شود [25].

3- شبیه‌سازی پدیده جدایی بین‌لایه‌ای

نمونه‌ای از ورق کامپوزیتی چند لایه با جدایی بین‌لایه‌ای داخلی در "شکل 3" نشان داده شده است. در این‌جا فرض شده است که منطقه جدایی بین‌لایه‌ای بین دو لایه که لایه‌های بالایی و پایینی ورق کامپوزیتی نامیده می‌شوند، واقع شده است. برای این‌که پیوستگی ماده کامپوزیتی حفظ شود، جابه‌جایی و تغییرات هر جفت گره مماس روی لایه‌های بالا و پایین ورق چند لایه یکسان در نظر گرفته شده است. این تغییرات در منطقه‌ای که جدایی بین‌لایه‌ای اتفاق افتاده است، یکسان نمی‌باشد. برای شبیه‌سازی وضعیت واقعی جدایی بین‌لایه‌ای، یک لایه چسبناک[1] بسیار نازک بین لایه‌های بالا و پایین قرار داده شده است.

نکته بسیار مهم این است که وقتی ورق چندلایه در حالت جدایی بین‌لایه‌ای حرکت می‌کند، از نظر فیزیکی غیرممکن است که لایه‌های بالا و پایین به‌یکدیگر نفوذ نکنند. بنابراین برای جلوگیری از نفوذپذیری گره‌ها در مناطق مذکور از المان‌های مجازی[2] به‌صورت فنر استفاده شده است

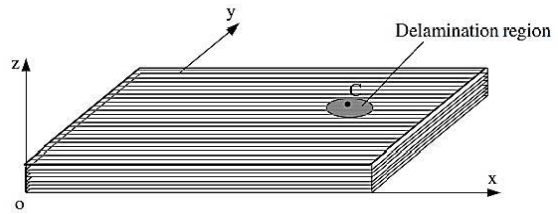

Fig. 3 Geometry of the laminated composite plate with delamination

شکل 3 هندسه ورق کامپوزیتی چندلایه با جدایی بین‌لایه‌ای

[1] Resin
[2] Virtual elements

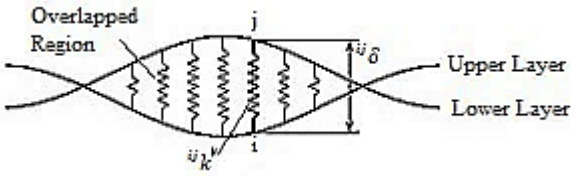

Fig. 4 The virtual spring element for preventing layers penetration

شکل 4 المان فنر مجازی برای جلوگیری از نفوذ لایه‌ها

[26-29]. "شکل 4" نمونه‌ای از کاربرد المان‌های مجازی را نشان می‌دهد.

هر المان فنر مجازی یک ثابت سختی k مربوط به خود را دارد. تغییرات جابه‌جایی گره‌های مجاور هم در منطقه شامل جدایی بین‌لایه‌ای به مقدار زیادی به پارامتر k وابسته است [28،29]. در واقع المان فنر مجازی با سختی مشخص به‌عنوان یک قید اضافی مطرح می‌باشد که می‌تواند تا حدودی منجر به افزایش فرکانس‌های ارتعاشی شود. برای محدودیت کامل حرکت گره‌ها در مناطق با جدایی بین‌لایه‌ای به‌ویژه در مناطقی با مساحت زیاد، می‌توان از فنرهایی با ثابت 10^6 N/m استفاده نمود که فرکانس‌های طبیعی را افزایش می‌دهد. اگر سختی این المان‌های مجازی بیشتر از یک مقدار خاص باشد، منجر به واگرایی جواب می‌شود و اگر این مقدار کمتر از یک مقدار مشخص باشد، حرکت گره‌های مجاور روی سطوح آزاد شامل جدایی بین‌لایه‌ای محدود نمی‌باشد. در اکثر موارد اگر فنرهای مجازی با ثابت بیشتر از 0.1 N/m انتخاب شود، نفوذپذیری لایه‌ها بهم اتفاق نمی‌افتد. مقادیر سختی برای شبیه‌سازی مناسب پدیده جدایی بین‌لایه‌ای برای حالت‌های مختلف، متفاوت می‌باشد.

برای تحلیل عددی و شبیه‌سازی جدایی بین‌لایه‌ای و به‌دست آوردن فرکانس‌های طبیعی از نرم‌افزار آباکوس نسخه 6.13 استفاده می‌شود و تاثیر پارامترهایی مثل اندازه[3] (a)، خروج از مرکزی[4] (a/b) و موقعیت[5] (فاصله x و y و y مرکز منطقه با جدایی بین‌لایه‌ای از مرکز لایه چسبناک) روی فرکانس‌های طبیعی بررسی می‌شود. از آن‌جایی که بعد از این‌که جدایی بین لایه‌ای در کامپوزیت‌ها اتفاق می‌افتد، منطقه جدایی بین‌لایه‌ای به‌صورت دوایر و یا اشکالی شبیه به بیضی مشاهده می‌شود [26،30-32]، بررسی تاثیرات این عامل روی فرکانس‌های طبیعی در قالب پارامترهایی همچون اندازه و خروج از مرکزی بررسی می‌شود.

4- مشخصات ورق لایه‌ای کامپوزیتی

نمونه ورق چند لایه کامپوزیتی مورد بررسی در این مقاله، به‌منظور اعتبارسنجی و مقایسه با تحقیقات پیشین، یک ورق 8 لایه با زمینه پلیمری و تقویت شده با الیاف شیشه[6] می‌باشد. سطح مقطع ورق کامپوزیتی به شکل مربعی به طول225.5 میلی‌متر و ضخامت کل 8 لایه 2.05 میلی‌متر می‌باشد. توزیع جهت‌گیری الیاف در امتداد ضخامت ورق به‌صورت کد زیر درنظر گرفته می‌شود که // نشان‌دهنده محل جدایی بین‌لایه‌ای در ورق 8 لایه کامپوزیتی می‌باشد.

$0^\circ/90^\circ/0^\circ//90^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$

همان‌طوری که اشاره شد برای شبیه‌سازی وضعیت واقعی جدایی بین‌لایه‌ای، یک لایه چسبناک بسیار نازک بین لایه‌های بالا و پایین قرار داده می‌شود. ضخامت این لایه حداقل مقدار ممکن در نرم‌افزار آباکوس (0.01 میلی‌متر) در نظرگرفته می‌شود. با درنظر گرفتن المان‌های شش وجهی آجری

[3] Size
[4] Eccentricity
[5] Location
[6] Glass Fibre Reinforced Polymers (GFRP)

جدول 1 خواص مکانیکی ماده ارتوتروپ برای لایه‌های بالا و پایین [26]

Table 1 Mechanical properties of the orthotropic material for the upper and lower layers [26]

خاصیت	مقدار
E_1	37.78 GPa
E_2	10.9 GPa
E_3	10.9 GPa
v_{12}	0.3
v_{13}	0.3
v_{23}	0.11
G_{12}	4.91GPa
G_{13}	4.91GPa
G_{23}	4.91GPa
ρ	kgm^{-3}1813.9

مدل می شود. جنس این لایه از رزین اپوکسی[1] می‌باشد [30-32].

خواص مکانیکی (ثابت‌های الاستیک و چگالی ماده مذکور) مربوط به ماده ارتوتروپ لایه‌های بالا و پایین و همچنین ماده ایزوتروپ رزین اپوکسی در نظرگرفته شده برای لایه چسبناک بترتیب در جداول 1 و 2 آورده شده است [26]. شایان ذکر است چسب اتصال لایه‌ها از جنس رزین اپوکسی در محل جدایی بین لایه ای وجود ندارد.

شرایط مرزی برای ورق چند لایه کامپوزیتی به‌صورت چهار گوشه آزاد فرض می‌شود.

"شکل‌های 5 و 6" نمایی از لایه بالایی و لایه میانی ورق کامپوزیتی را نشان می‌دهند. مش‌بندی در هر راستا به ابعاد 40×40 انجام شده است. برای مش‌بندی لایه میانی نیز از پارتیشن‌بندی استفاده شده است.

در بسیاری از مقالات از جمله در [30-32] اشاره شده است که برای جلوگیری از نفوذپذیری لایه‌ها بهم در مناطقی که جدایی بین‌لایه‌ای اتفاق افتاده است، از المان‌های تماسی 52[2] یا تماسی 178[3] موجود در نرم‌افزار

جدول 2 خواص مکانیکی رزین اپوکسی [26]

Table 2 Mechanical Properties of Epoxy resin [26]

خاصیت	مقدار
E	3.3 GPa
v	0.37
ρ	kgm^{-3}1200

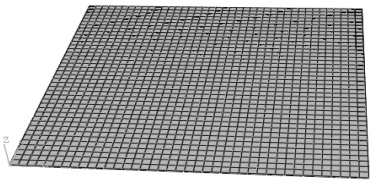

Fig. 5 A view of the meshed model of upper layer

شکل 5 نمایی از مدل مش‌بندی شده لایه بالایی

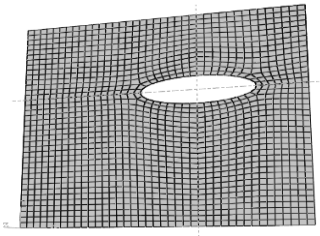

Fig. 6 A view of the meshed model of middle layer

شکل 6 نمایی از مدل مش‌بندی شده لایه میانی

[1] Epoxy Resin
[2] Contact52
[3] Contact178

انسیس[4] استفاده شود. این موضوع برای حالتی که تحلیل موردنظر تحلیلی فرکانسی برای پیداکردن فرکانس‌های طبیعی باشد، درست نیست. از آن‌جایی که استفاده از المان‌های تماسی 52 یا تماسی 178 به نوعی سازه موردنظر را غیرخطی می‌کند و تحلیل فرکانسی نرم‌افزار انسیس فقط شامل تحلیل‌های خطی می‌باشد، استفاده از این قیدها در مناطقی با جدایی بین‌لایه‌ای تاثیری ندارد و در صورت تغییر پارامترهای آن از جمله سختی، نرم‌افزار این تغییرات را اعمال نمی‌کند. در صورتی که شرایط حاکم بر مسئله به‌گونه‌ای باشد که سازه موردنظر تحت نیرو و یا فشار باشد و به‌نوعی دچار تغییر شکل و یا تنش ناشی از این عوامل باشد، می‌توان از آنالیز مودال موجود در انسیس برای پیدا کردن فرکانس‌های طبیعی استفاده نمود. به همین دلایل با توجه به شرایط مرزی حاکم بر ورق 8 لایه کامپوزیتی در مقاله حاضر جهت جلوگیری از نفوذپذیری لایه‌ها از المان‌های فنر استفاده می‌شود.

5- نتایج شبیه‌سازی و بحث

جهت صحت گذاری نتایج به‌دست آمده، مقایسه‌ای بین نتایج به‌دست آمده و نتایج [17] در جدول 3 آورده شده است. النفائی در [17] با درنظر گرفتن المان‌های شش وجهی آجری و با استفاده از یک جدا کننده 0.02 میلی‌متری به‌عنوان یک فاصله برای لایه میانی، مدلی را ارائه کرده است. شبیه‌سازی نرم‌افزاری در مقاله حاضر و در [17] با استفاده از نرم‌افزار آباکوس بوده است، در هر دو روش از المان‌های شش وجهی آجری برای المان‌بندی ورق کامپوزیتی استفاده شده است. جدول 3 نشان‌دهنده صحت مدل‌سازی حاضر می‌باشد.

جهت اطمینان از نتایج مدل‌سازی حاضر، با توجه به مراجع در دسترس [33,26,17]، مقایسه دیگری روی ورق 8 لایه کامپوزیتی سالم با جهت‌گیری 0 درجهٔ الیافِ تمام لایه‌ها، با نتایج آزمایشگاهی [33] صورت گرفته است. مقطع ورق کامپوزیتی به شکل مربعی به طول ضلع 178 میلی‌متر و ضخامت کلِ 8 لایه 1.58 میلی‌متر می‌باشد. خصوصیات مکانیکی هر لایه به‌صورت E_1 = 172.7 GPa, E_2 = E_3 = 7.2 GPa ,G_{12} = G_{13} = 3.76 GPa, G_{23}= 2.71 GPa, ν_{12} = ν_{13} = 0.3, ν_{23} = 0.33, ρ = 1566 kgm^{-3} می‌باشد [33,26,17]. جدول 4 مقایسه تحقیق حاضر را با مراجع [33,26,17]، برای 6 مود فرکانسی نشان می‌دهد. مطالعه [33] داده‌های تجربی و مطالعات [26,17] تحلیل‌های عددی را شامل می‌شوند. با مشاهده داده‌های این جدول، صحت مدل‌سازی ارائه شده در تحقیق حاضر می‌تواند تأیید شود.

نتایج به‌دست آمده برای حالت وجود جدایی بین‌لایه‌ای و تاثیر این پدیده بر روی فرکانس‌های طبیعی ورق مورد مطالعه اصلی با مشخصات ارائه شده

جدول 3 مقایسه فرکانس‌های طبیعی نتایج استخراجی به هرتز با [17]

Table 3 Comparison of the extracted natural frequencies in Hertz with [17]

شماره مود فرکانسی	نتایج حاضر	نتایج [17]
1	70.12	70.09
2	135.56	133.87
3	170.03	168.73
4	194.53	195.86
5	218.33	218.30
6	355.79	360.34
7	375.67	373.41
8	423.14	426.28
9	461.92	460.30
10	509.34	508.41

[4] ANSYS

جدول 4 مقایسه نتایج برای 6 مود فرکانسی ورق کامپوزیتی با لایه‌چینی $[0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ]_s$

Table 4 Comparison of the results for six frequency modes of the composite plate with stacking $[0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ]_s$

مود فرکانسی	نتایج تحقیق حاضر	نتایج تحلیل عددی [26]	نتایج تحلیل عددی [33]	داده آزمایشگاهی [33]	نتایج تحلیل عددی [17]
1	81.59	82.26	83.57	81.50	81.48
2	109.68	113.10	118.42	107.40	109.20
3	199.59	207.29	207.79	196.60	199.50
4	301.95	325.28	329.41	285.50	300.46
5	391.23	408.51	419.83	382.50	391.40
6	536.47	539.92	546.93	531.00	533.89

در جدول 1 و 2، در قالب سه پارامتر اندازه، خروج از مرکزی و موقعیت مرکز منطقه با جدایی بین‌لایه‌ای نسبت به مرکز لایه میانی در بخش‌های بعد ارائه و بررسی می‌شوند.

5-1- تاثیر اندازه منطقه جدایی بین‌لایه‌ای روی فرکانس‌های طبیعی

در جدول 5 فرکانس‌های طبیعی برای 15 مود اول برای حالتی که خروج از مرکزی $a/b=1$ در نظر گرفته شده، به ازای مقادیر مختلف اندازه a و b و در مرکز لایه میانی نشان داده شده است. واحد مربوط به مقادیر a وb به میلی‌متر می‌باشد.

همان‌طوری‌که در جدول 5 مشاهده می‌شود، فرکانس‌های طبیعی با افزایش اندازه و به‌عبارتی با افزایش مساحت منطقه جدایی بین‌لایه‌ای، کاهش می‌یابند. معمولاً این کاهش در مودهای بالا محسوس‌تر است. البته لازم به تذکر است که نتایج به‌دست آمده در هر مود فرکانسی و در هر موقعیت به‌طور خاصی وابسته به توزیع جرم، سختی ماده دارد و به عبارت دیگر وابسته به تغییر شکل خمشی است و امکان تغییر ناچیز فرکانس طبیعی در مودهای بالا نیز وجود دارد. ولی به طور کلی کاهش فرکانس‌های طبیعی در مودهای بالا بیشتر مشاهده می‌شود.

در "شکل 7" فرکانس‌های طبیعی برای مودهای 9 و 11 به ازای اندازه‌های مختلف نشان داده شده است. کاهش فرکانس طبیعی در این دو مود به‌وضوح دیده می‌شود.

در "شکل‌های 8 و 9" شکل مودهای مربوط به مودهای 9 و 11 برای حالتی که $a=b=30$ است و جدایی بین‌لایه‌ای در مرکز لایه میانی رخ داده است، نشان داده شده است.

زمانی که ورق کامپوزیتی دارای آسیب جدایی بین‌لایه‌ای است و با توجه به جدول 5، فرکانس‌های طبیعی در مودهای مختلف و به ازای مقادیر متفاوتی از پارامتر اندازه جدایی بین‌لایه‌ای (a)، به نسبت‌های گوناگونی کاهش یافته است. برای این‌که این نسبت‌ها بهتر مشاهده شود، پارامتر K که به‌صورت رابطه (1) بیان می‌شود، تعریف می‌شود.

$$K=\frac{|\omega_{\text{delaminated}}-\omega_{\text{intact}}|}{\omega_{\text{intact}}}\times 100 \qquad (1)$$

در رابطه (1)، $\omega_{\text{delaminated}}$ فرکانس طبیعی ورق با جدایی بین‌لایه‌ای و ω_{intact} فرکانس طبیعی ورق سالم می‌باشد. "شکل‌های 10 و 11"

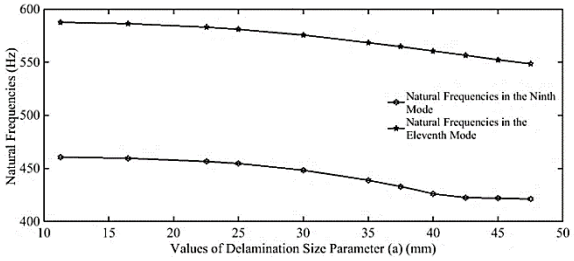

Fig. 7 Variation of the natural frequencies in the ninth and eleventh modes versus different values of delamination size parameter

شکل 7 تغییرات فرکانس‌های طبیعی در مودهای 9 و 11 برحسب مقادیر مختلف پارامتر اندازه جدایی بین‌لایه‌ای

جدول 5 فرکانس‌های طبیعی ورق کامپوزیتی با جدایی بین‌لایه‌ای در نقاط مختلف (هرتز)

Tabel 5 Natural frequencies of the composite plate with delamination at various points (Hz)

مود فرکانسی	$a=b$=11.275	$a=b$=16.5	$a=b$=22.55	$a=b$=25	$a=b$=30	$a=b$=35	$a=b$=37.5	$a=b$=40	$a=b$=42.5	$a=b$=45	$a=b$=47.5
1	69.673	69.671	69.666	69.659	69.657	69.655	69.651	69.647	69.643	69.638	69.633
2	134.254	134.252	134.248	134.237	134.234	134.206	134.183	134.143	134.100	134.030	133.951
3	169.205	169.202	169.202	169.183	169.172	169.104	169.045	168.963	168.856	168.703	168.523
4	194.790	194.752	194.652	194.568	194.374	194.042	193.817	193.554	193.254	192.883	192.495
5	217.726	217.705	217.632	217.572	217.448	217.230	217.089	216.905	216.706	216.444	216.170
6	356.541	356.528	356.445	356.351	356.064	355.338	354.759	353.897	352.839	349.303	345.401
7	373.443	372.867	371.312	370.343	367.352	362.879	360.124	356.848	353.442	351.175	349.334
8	424.193	424.182	424.140	424.066	423.949	423.630	423.365	423.019	419.112	410.995	403.492
9	460.725	459.632	456.544	454.574	448.375	438.854	432.949	426.120	422.571	421.948	421.221
10	506.827	506.809	506.695	506.556	506.190	505.328	504.632	503.711	502.553	500.972	499.220
11	587.552	586.271	582.971	581.038	575.557	568.475	564.673	560.514	556.634	552.244	548.464
12	636.605	634325	628.439	625.069	615.899	605.179	600.054	595.057	590.901	586.893	560.404
13	728.658	728.511	727.679	726.903	723.505	714.244	705.299	684.415	656.150	600.461	583.869
14	778.103	777.836	777.174	776.750	775808	774.577	773.888	773.045	760.738	734.031	720.481
15	865.845	865.660	864.584	863.549	859.858	852.395	831.828	788.695	772.115	770.828	769.345

تغییرات پارامتر K را به‌عنوان تابعی از پارامتر اندازه جدایی بین‌لایه‌ای برای حالتی که آسیب در مرکز لایه میانی اتفاق افتاده است، را نشان می‌دهند. همان‌طوری‌که در "شکل‌های 10 و 11" مشاهده می‌شود، تغییرات پارامتر K در مودهای بالاتر محسوس‌تر است. این تغییرات برای مود نهم بیشتر از سایر مودها به چشم می‌آید. برای مودهایی همچون مود دهم نیز همان‌طوری‌که قبلاً اشاره شد، استثناهایی وجود دارد که کاهش کم فرکانس‌های طبیعی می‌تواند ناشی از تفاوت توزیع جرم و سختی و تغییر شکل در این مود خاص باشد. ولی به‌طور کلی روند کاهش فرکانس‌های طبیعی در مودهای بالا، بیشتر دیده می‌شود.

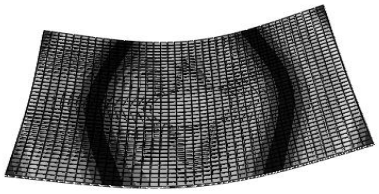

Fig. 8 The mode shape of the ninth mode (natural frequency of 448.375 Hz)

شکل 8 شکل مود مربوط به مود نهم (فرکانس طبیعی 448.375 هرتز)

Fig. 9 The mode shape of the eleventh mode (natural frequency of 575.557)

شکل 9 شکل مود مربوط به مود یازدهم (فرکانس طبیعی 575.557 هرتز)

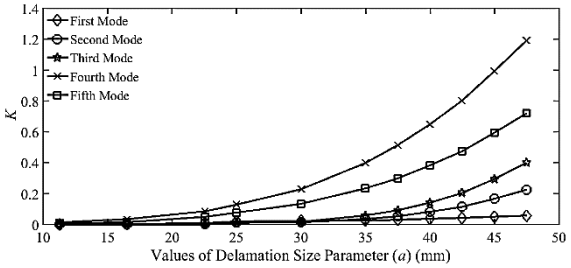

Fig. 10 Variation of the natural frequencies of the first to fifth modes versus different values of delamination size parameter.

شکل 10 تغییرات فرکانس‌های طبیعی در مودهای اول تا پنجم برحسب مقادیر مختلف پارامتر اندازه جدایی بین‌لایه‌ای

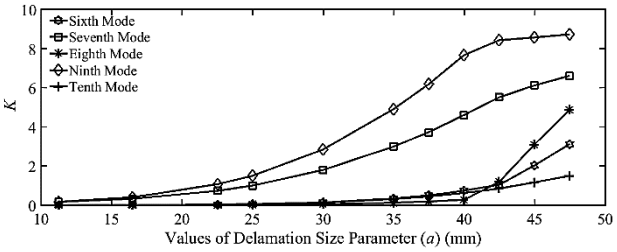

Fig. 11 Variation of the natural frequencies of the sixth to tenth modes versus different values of delamation size parameter.

شکل 11 تغییرات فرکانس‌های طبیعی در مودهای ششم تا دهم برحسب مقادیر مختلف پارامتر اندازه جدایی بین‌لایه‌ای

5-2- تاثیر خروج از مرکزی منطقه جدایی بین‌لایه‌ای روی فرکانس‌های طبیعی

در جدول 6 فرکانس‌های طبیعی برای 15 مود اول برای حالتی که پارامتر اندازه (a) به‌صورت ثابت یعنی مقدار 37.5 میلی‌متر در نظر گرفته شده، نشان داده شده است. مقدار خروج از مرکزی با تغییر پارامتر b (به میلی‌متر) تغییر داده شده است. همچنین موقعیت منطقه با جدایی بین‌لایه‌ای در مرکز لایه میانی می‌باشد.

همان‌طور که از جدول 6 مشاهده می‌شود، با کاهش پارامتر b یعنی به عبارتی با افزایش خروج از مرکزی، فرکانس‌های طبیعی افزایش یافته است. این افزایش در مودهای بالا محسوس‌تر است. همچنین مشاهده می‌شود در مودهای بالا تغییر فرکانس‌های طبیعی به ازای افزایش خروج از مرکزی به اندازه تاثیر پارامتر اندازه نیست.

فرکانس‌های طبیعی برای مودهای 11 و 12 به ازای خروج از مرکزی با a ثابت و b متغیر در "شکل 12" نشان داده شده است.

5-3- تاثیر موقعیت منطقه جدایی بین‌لایه‌ای روی فرکانس‌های طبیعی

در جدول 7 تاثیر عامل موقعیت روی فرکانس‌های طبیعی را به ازای خروج از مرکزی $a/b=1$ و $a=30$ mm در موقعیت‌های مختلف نشان داده شده است. واحد موقعیت‌های مختلف منطقه جدایی بین‌لایه‌ای به میلی‌متر و واحد فرکانس طبیعی به هرتز است.

نتایج تحلیل نشان داده است که فاصله مرکز منطقه جدایی بین‌لایه‌ای از مرکز لایه میانی نیز روی فرکانس‌های طبیعی سازه تاثیرگذار است. افزایش این فاصله در بعضی از مودهای ارتعاشی باعث افزایش فرکانس طبیعی و در برخی از مودها باعث کاهش می‌شود که علت این پدیده هم می‌تواند توزیع متفاوت سختی و جرم در مودهای مختلف ارتعاشی باشد. در هر یک از موقعیت‌ها با افزایش شماره مود فرکانسی فرکانس طبیعی نیز افزایش یافته است.

6- پیش‌بینی با شبکه عصبی پس انتشار خطا

مهمترین بخش در نتیجه‌گیری بهینه از شبکه‌های عصبی پس از تعیین ساختار آن‌ها، استفاده از روش صحیح جهت آموزش آن‌ها می‌باشد. در واقع شبکه عصبی به ازای تعداد معینی از الگوهای ورودی و خروجی مسأله (پاسخ سیستم) آموزش داده شده و به ازای تعداد معینی از الگوهای ورودی و خروجی در عین آموزش دیدن مورد آزمون واقع می‌گردد. اگر آموزش شبکه عصبی در این دو مرحله درست صورت گرفته باشد، این شبکه قادر خواهد بود به ازای الگوهای ناشناخته ورودی در محدوده الگوهای اولیه ورودی، پاسخ خروجی سیستم را مشخص نماید. از بهترین و موثرترین شیوه‌های آموزش

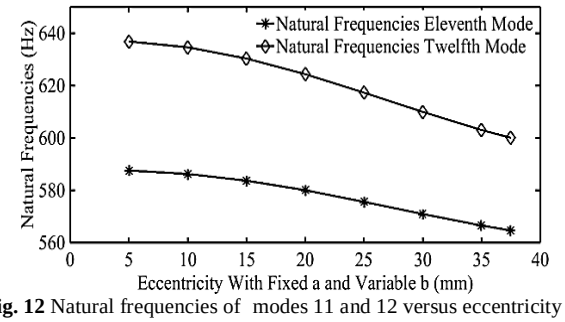

Fig. 12 Natural frequencies of modes 11 and 12 versus eccentricity

شکل 12 فرکانس‌های طبیعی برای مودهای 11 و 12 برحسب خروج از مرکزی

جدول 6 فرکانس‌های طبیعی ورق کامپوزیتی به‌ازای مقادیر مختلف پارامتر b (هرتز)

Tabel 6 Natural frequencies of the composite plate for different values of parameter b (Hz)

b=37.5	b=35	b=30	b=25	b=20	b=15	b=10	b=5	مود فرکانسی
69.651	69.653	69.660	69.664	69.673	69.673	69.675	69.675	1
134.183	134.202	134.234	134.250	134.264	134.267	134.269	134.271	2
169.045	169.064	169.102	169.135	169.169	169.187	169.195	169.198	3
193.817	193.938	194.167	194.369	194.550	194.684	194.771	194.817	4
217.089	217.172	217.334	217.466	217.574	217.656	217.707	217.773	5
354.759	355.034	355.527	355.900	356.204	356.368	356.458	356.494	6
360.124	361.455	364.366	367.144	369.598	371.506	372.819	373.450	7
423.365	423.475	423.680	423.844	424.001	424.094	424.173	424.207	8
432.949	436.603	443.538	449.430	454.102	457.522	459.738	460.814	9
504.632	505.114	505.833	506.280	506.559	506.717	506.797	506.830	10
564.673	566.542	570.953	575.587	580.041	583.693	586.251	587.573	11
600.054	603.043	609.972	617.322	624.384	630.659	634.638	636.861	12
705.299	710.568	719.074	724.428	727.166	728.339	728.758	728.763	13
773.888	774.177	774.870	775.612	776.512	777.306	777.919	778.226	14
831.828	842.038	855.820	859.783	862.601	864.331	865.372	865.830	15

جدول 7 تاثیر عامل موقعیت جدایی بین لایه‌ای بر فرکانس‌های طبیعی ورق کامپوزیتی

Table 7 Effect of the delamination location factor on the natural frequencies of the composite plate

y=0 x=40	y=0 x=30	y=0 x=20	y=0 x=0	y=0 x=0	مود فرکانسی
69.656	69.660	69.660	69.661	69.657	1
134.226	134.231	134.231	134.234	134.234	2
168.593	168.789	168.982	169.121	169.172	3
194.513	194.453	194.410	194.383	194.374	4
217.572	217.533	217.487	217.460	217.448	5
353.532	354.300	355.154	355.818	356.064	6
367.268	367.297	367.281	367.323	367.352	7
421.770	422.686	423.366	423.800	423.949	8
459.251	456.470	452.726	499.576	448.375	9
505.346	505.582	505.894	506.098	506.190	10
583.151	580.477	577.952	576.180	575.557	11
633.468	628.752	622.320	617.564	615.899	12
723.425	723.507	723.489	723.486	723.505	13
773.521	774.093	774.900	775.561	775.808	14
850.349	850.549	855.391	858.569	859.858	15

شبکه‌های عصبی چندلایه، الگوریتم پس انتشار خطا می‌باشد [23]. چون انگیزه اصلی استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا دستیابی به تعادل بین دادن پاسخ صحیح به الگوهای آموزش داده شده به شبکه (یادگیری) و تولید پاسخ مناسب به الگوهای جدید (تعمیم) است، ادامه آموزش شبکه عصبی زمانی که مقدار مربعات خطا واقعا حداقل شده باشد، الزاماً مفید نمی‌باشد [23]. معمولاً از دو مجموعه داده مجزا در زمان آموزش شبکه استفاده می‌شود، یک مجموعه برای آموزش الگوها و یک مجموعه برای آموزش- آزمون الگوها.

تغییر وزن‌ها در شبکه براساس داده آموزش صورت می‌گیرد و در بازه‌هایی در طول آموزش، خطای شبکه برای داده‌های آموزش- آزمون محاسبه می‌شود. بر این اساس تا زمانی که مقدار خطای داده‌های آموزش- آزمون در حین آموزش کاهش می‌یابد، آموزش شبکه ادامه دارد. زمانی که خطای شبکه شروع به افزایش می‌کند، شبکه مشخصاً شروع به حفظ کردن الگوهای آموزش می‌نماید و قابلیت تعمیم‌دهی خود را از دست می‌دهد. در این نقطه، آموزش پایان می‌پذیرد [23] .

در "شکل 13" فلوچارت الگوریتم پس انتشار خطا آورده شده است. شبکه ابتدا مقادیر اولیه‌ای را به وزن‌ها و بایاس‌ها اختصاص می‌دهد و خروجی‌های هر نرون در هر لایه مشخص می‌شود. خروجی هر نرون در لایه آخر محاسبه شده و اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی با خطای مطلوب مقایسه می‌شود و در صورت مغایرت، شبکه اصطلاحا پس انتشار می‌کند تا تنظیم وزن‌ها را برای رسیدن به خطای مطلوب انجام دهد [23].

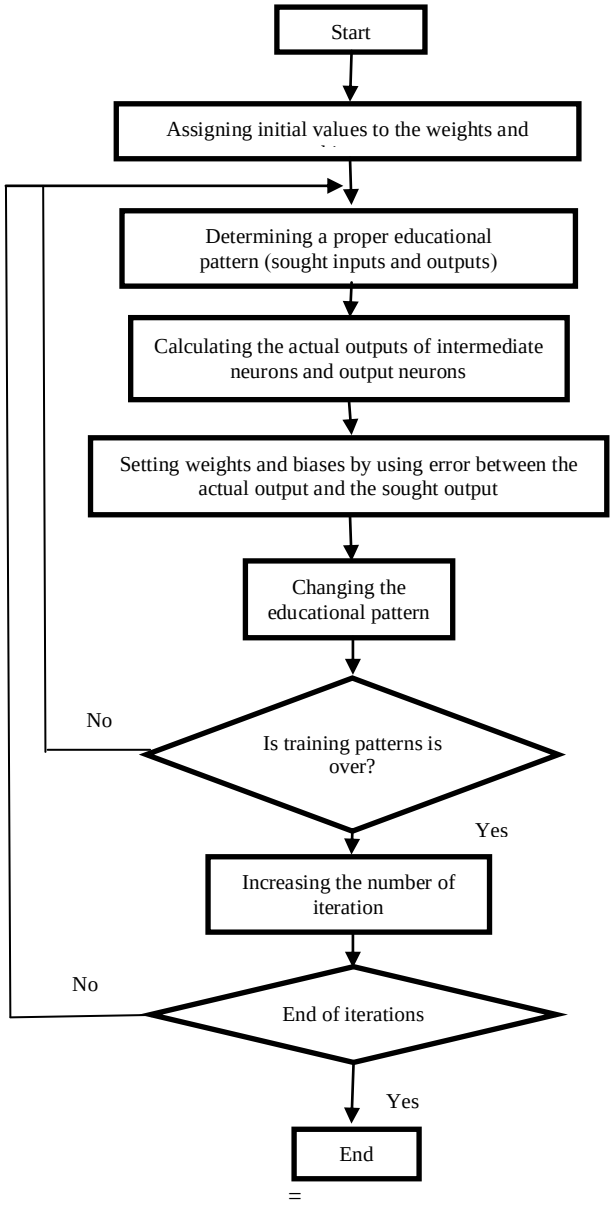

Fig. 13 Algorithm of the error back-propagation neural network.

شکل 13 الگوریتم شبکه عصبی پس انتشار خطا

6-1- ساختار شبکه

برای حالتی که جدایی بین‌لایه‌ای اتفاق افتاده است، 293 حالت مختلف که شامل تغییرات پارامترهای اندازه، خروج از مرکزی و موقعیت می‌باشد، بررسی شده است. از شبکه عصبی پس انتشار خطا نیز برای پیش‌بینی استفاده می‌شود. نحوه استفاده به این صورت است که بعد از این‌که فرایند شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس به اتمام رسید، فرکانس‌های طبیعی در 10 مود اول به عنوان ورودی‌های شبکه‌عصبی و پارامترهای مذکور به‌عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شوند. علت انتخاب ده مود فرکانسی به‌عنوان ورودی‌های شبکه عصبی در ادامه تشریح می‌شود. پس از این‌که شبکه آموزش یافت، می‌توان از الگوریتم پس انتشار خطا برای پیش‌بینی آسیب در ورق کامپوزیتی استفاده نمود. تعداد نرون‌های لایه ورودی و تعداد نرون‌های لایه خروجی، به تعداد ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم بوده و تعداد آن‌ها کاملاً مشخص می‌باشد.

نوع شبکه مورد استفاده جهت ارزیابی آسیب جدایی بین‌لایه‌ای، از نوع شبکه‌های عصبی سه لایه می‌باشد. معمولاً برای پیش‌بینی با شبکه عصبی پس انتشار خطا از یک لایه مخفی استفاده می‌شود و چنانچه نتایج تخمین زده شده به نتایج حقیقی نزدیک نبود، از دو لایه مخفی استفاده می‌شود. تعداد نرون‌های موجود در لایه‌های مخفی، به‌طور تجربی و از طریق سعی و خطا حاصل گردیده است [35،34]. در لایه مخفی اول تعداد 20 و در لایه مخفی دوم تعداد 13 نرون وجود دارد. این مقادیر از طریق سعی و خطا به‌دست آمده است. تابع فعال‌سازی هر دو لایه مخفی از نوع سیگموید دوقطبی می‌باشد. معمولاً برای لایه‌های میانی از این نوع تابع فعال‌سازی استفاده می‌شود، این انتخاب به این دلیل است که با توجه به برد این تابع فعال‌سازی، مقایر خروجی نرون‌های لایه‌های مخفی بین 1 و 1- قرار می‌گیرد و شبکه بهتر می‌تواند عملیات تنظیم وزن را انجام دهد [23]. در لایه خروجی نیز چهار نرون وجود دارد که بیانگر پارامترهای اندازه، خروج از مرکزی و موقعیت ناحیه با جدایی بین‌لایه‌ای می‌باشد. با توجه به این‌که لایه خروجی هر مقداری (خارج از بازه 1- و 1) را می‌تواند اختیار کند، از تابع فعال‌سازی خطی برای آن استفاده می‌شود [23]. "شکل 14" مدل استفاده شده شبکه عصبی پس انتشار خطا با دو لایه مخفی را نشان می‌دهد.

مهمترین مسأله در بخش انتخاب ساختار شبکه چند لایه، انتخاب تعداد لایه‌های مخفی شبکه و نیز تعداد نرون‌های موجود در این لایه‌ها می‌باشد. برای این منظور هیچ فرمول مدون و از پیش تعیین شده‌ای وجود نداشته و با توجه به سعی و خطا و آزمودن ساختارهای مختلف و مشاهده پارامترهای خروجی شبکه به ازای آن‌ها، ساختار بهینه تعیین می‌گردد. تعداد کم لایه‌ها

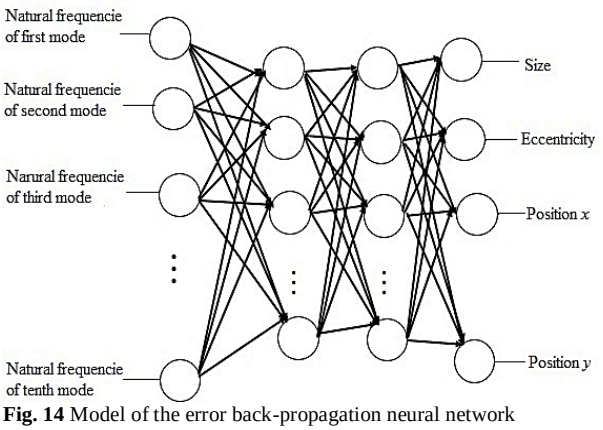

Fig. 14 Model of the error back-propagation neural network

شکل 14 مدل شبکه عصبی پس انتشار خطا

ممکن است در مسائل پیچیده جوابگو نباشد. از طرفی تعداد زیاد لایه‌ها نیز ممکن است شبکه را دچار فراانطباقی[1] نماید. این مطلب در مورد تعداد داده‌های ورودی شبکه نیز صادق می‌باشد [23]. در مقاله حاضر نیز با فرکانس‌های طبیعی در 10 مود اول نتایج پیش‌بینی شده شبکه عصبی دقت خوبی دارد.

در این پژوهش برای آموزش شبکه و نیز مقایسه عملکرد ساختارهای مختلف شبکه عصبی و نیز روش‌های مختلف الگوریتم پس انتشار خطا از شاخص کارایی میانگین مربعات خطا[2] مطابق رابطه (2) استفاده می‌شود.

$$mse = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(e_i)^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(t_i - a_i)^2 \qquad (2)$$

که در آن t_i مقادیر هدف (خروجی مطلوب شبکه) و a_i خروجی‌های واقعی شبکه عصبی می‌باشند.

تعداد کل داده‌های ورودی شبکه عصبی برابر با 293 داده درنظر گرفته شده است که از این تعداد 260 داده جهت آموزش شبکه عصبی و 33 داده نیز برای آزمون (تست) شبکه به‌کار رفته است. با توجه به شرایط مرزی حاکم بر مسئله و به‌دلیل تقارن، یک چهارم لایه میانی برای پیش‌بینی با استفاده از شبکه عصبی درنظر گرفته شده است.

6-2- آموزش شبکه

برای آموزش شبکه عصبی از کدنویسی با نرم‌افزار متلب[3] استفاده شده است. در این‌جا از دو روش آموزش لونبرگ– مارکوآرت[4] و پس‌انتشار خطای انعطاف پذیر[5] برای آموزش شبکه عصبی و مقایسه پاسخ‌ها استفاده شده است. الگوریتم لونبرگ-مارکوآرت روشی است برای یافتن کمینه یک تابع غیرخطی چند متغیره که به‌عنوان یک روش استاندارد برای حل مسئله کمینه مربعات برای توابع غیرخطی درآمده است. روش لونبرگ– مارکوآرت معمولاً از سرعت همگرایی بسیار بالاتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار بوده و برای شبکه‌های کوچک بسیار کاراست. اما با افزایش اندازه شبکه‌ها و تعداد وزن‌ها کارایی آن کاهش می‌یابد [34]. روش پس‌انتشار خطای انعطاف‌پذیر نیز در مسائل تشخیص الگوها از سریع‌ترین روش‌ها می‌باشد. حافظه موردنیاز برای این روش نیز کم خواهد بود. اما در مسائل تقریب تابع از قدرت روش قبل برخوردار نیست [34]. پارامترهای آموزش شبکه (تنظیمات کلی شبکه) با هر دو روش ثابت و مطابق جدول 8 آورده شده است.

همان‌طوری که در جدول 8 مشاهده می‌شود، برای آموزش شبکه عصبی پس انتشار خطا مقدار خطای 0.01 و بیشترین تکرار (دور) 500 درنظر گرفته شده است. هر کدام از این حالت‌ها که زودتر اتفاق بیفتد، فرایند آموزش شبکه عصبی متوقف می‌شود.

جدول 8 تنظیمات شبکه عصبی

Table 8 The neural network settings

ساختار	4-13-20-10
توابع محرک لایه های مخفی	سیگموید دوقطبی
تابع محرک لایه خروجی	خطی
بیشترین تکرار	500
بیشترین زمان	180 ثانیه
خطای مورد نظر	0.01

[1] Over Fitting
[2] Mean Squared Error (mse)
[3] MATLAB R2013a
[4] Levenberg-Marquardt (trainlm)
[5] Resilient Backpropagation (trainrp)

جدول 9 مقایسه‌ای بین عملکرد شبکه با ورودی‌های مختلف را نشان می‌دهد.

همان‌طوری که در جدول 9 مشاهده می‌شود به ازای ورودی‌های مختلف عملکرد شبکه متفاوت است. با آزمایش ورودی‌های مختلف، 10 مود اول فرکانسی نتایج بهتری را به‌همراه دارد که نتایج آن در ادامه تشریح شده است.

6-3- نتایج آموزش شبکه

در این بخش در قالب بررسی چند فاکتور مهم، نتایج حاصل از آموزش شبکه عصبی سه‌لایه با الگوریتم پس انتشار خطا آورده شده است.

6-3-1- بررسی اثر ساختار شبکه

در جداول 10 و 11 نتایج حاصل از انتخاب ساختارهای مختلف برای معماری شبکه عصبی به‌کار رفته، آورده شده است. جدول 10 مربوط به نتایج ساختارهای مختلف شبکه با آموزش به روش لونبرگ– مارکوآرت و جدول 11 مربوط به نتایج ساختارهای مختلف شبکه به روش پس انتشار خطای انعطاف‌پذیر می باشد. این نتایج بهترین نتایج به‌دست آمده برای آموزش شبکه با آن ساختار طی تکرارهای فراوان می‌باشد.

همان‌طوری‌که از جدول 10 مشاهده می‌شود، ساختار (4-13-20-10) بهترین عملکرد را در بین ساختارها داراست.

از مقایسه دو جدول 10 و 11 می‌توان نتیجه گرفت که آموزش شبکه عصبی به روش لونبرگ – مارکوآرت نتایج مطلوب‌تری را چه از لحاظ کاهش زمان و چه از لحاظ بهبود شاخص عملکرد، در بر خواهد داشت.

6-3-2- بررسی مشخصه عملکرد حالت بهینه

"شکل 15" مشخصه عملکرد شبکه با ساختار (4-13-20-10) برای رسیدن به حد مطلوب خطای تعریف شده برای آن را نشان می‌دهد. این مشخصه مربوط به حالت بهینه‌ای است که در جدول 8 مشخصات آن آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شبکه پس از 49 دور آموزش به مقدار خطای مطلوب 0.01 رسیده است.

6-3-3- بررسی مقایسه‌ای خروجی شبکه

در این بخش برای تعداد 15 داده، مقایسه‌ای بین خروجی‌های واقعی مساله و خروجی‌های شبکه عصبی مصنوعی سه لایه آموزش دیده با الگوریتم پس انتشار خطا با روش آموزش لونبرگ- مارکوآرت انجام شده است. "شکل 16" این مقایسه را نشان می‌دهد. محور عمودی نمودار مقادیر پارامتر اندازه جدایی بین‌لایه‌ای (a) را برای حالتی نشان می‌دهد که آسیب در مرکز لایه میانی اتفاق افتاده است.

همان‌طوری‌که در "شکل 16" نشان داده شده است، نتایج پیش‌بینی شده شبکه عصبی با نتایج واقعی تطابق بسیار خوبی دارد. به‌طور کلی می‌توان گفت که شبکه عصبی پس انتشار خطا ابزار خوبی برای پیش‌بینی و مدل‌سازی سیستم‌های مختلف می‌باشد.

نتایج پیش‌بینی شده شبکه عصبی برای 33 نمونه تست که شامل حالت‌های مختلفی از آسیب جدایی بین‌لایه‌ای است، به همراه مقادیر شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار آباکوس در جدول 12 آورده شده است. برای زمانی که جدایی بین‌لایه‌ای اتفاق افتاده است، تغییرات پارامترهای اندازه (a)، خروج از مرکزی (a/b) و موقعیت (x و y) می‌باشد، بررسی شده است. از شبکه عصبی پس انتشار خطا نیز برای پیش‌بینی استفاده شده است. نحوه استفاده به این صورت است که بعد از این‌که فرایند شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس به اتمام رسید، فرکانس‌های طبیعی در 10 مود اول به‌عنوان ورودی‌های شبکه عصبی و پارامترهای مذکور به‌عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شوند.

پس از این‌که شبکه برای 260 نمونه آموزش پیدا کرد، برای 33 حالت مختلف هم شبکه تست شده است تا دقت پیش‌بینی شبکه مورد ارزیابی قرار بگیرد. همان‌طوری‌که در جدول 12 نشان داده شده است، مقادیر پیش‌بینی

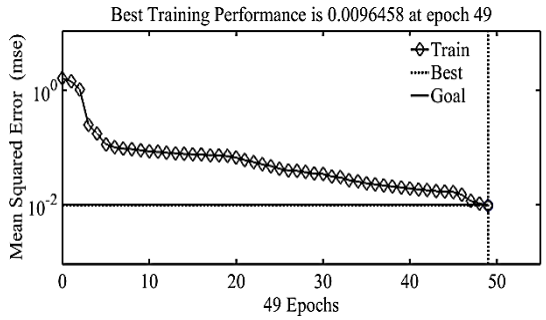

Fig. 15 Performance characteristic of the neural network with Levenberg – Marquardt training at optimal state

شکل 15 مشخصه عملکرد شبکه عصبی با روش آموزش لونبرگ – مارکوآرت در حالت بهینه

جدول 9 مقایسه عملکرد شبکه با ورودی‌های مختلف

Table 9 Comparison of the network performance with different inputs

تعداد ورودی	سه	پنج	هفت	پانزده
mse	0.1951	0.0511	0.0238	0.0592
تعداد تکرار	-	140	88	127
زمان (ثانیه)	-	12	9	10

جدول 10 نتایج ساختارهای مختلف شبکه با آموزش به روش لونبرگ – مارکوآرت

Table 10 The results of various network structures via training by Levenberg – Marquardt method

ساختار	4-12-25-10	4-15-30-10	4-17-23-10	4-20-25-10	4-14-22-10	4-13-20-10
mse	0.0075	0.0153	0.0146	0.0169	0.0088	0.0064
تعداد تکرار	53	71	61	62	56	49
زمان (ثانیه)	7	11	7	10	6	3

جدول 11 نتایج ساختارهای مختلف شبکه با آموزش به روش پس انتشار خطای انعطاف‌پذیر

Table 11 The results of various network structures via training by flexible error propagation method

ساختار	4-12-25-10	4-15-30-10	4-17-23-10	4-20-25-10	4-14-22-10	4-13-20-10
mse	0.0175	0.0221	0.0206	0.0228	0.0198	0.0094
تعداد تکرار	408	522	535	577	412	323
زمان (ثانیه)	9	9	9	9	9	9

جدول 12 مقایسه نتایج پیش‌بینی شده شبکه عصبی با مقادیر حقیقی

Table 12 comparison of the results predicted by the neural network with real values

شماره	نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار آباکوس (متر)				نتایج پیش‌بینی شده با شبکه عصبی (متر)			
تست	*a*	*a/b*	*x*	*y*	*a*	*a/b*	*x*	*y*
1	0.0252	1	0	0	0.025266	1.001685	-0.00046	-0.00082
2	0.036	1	0	0	0.035214	0.976543	0.002447	0.000095
3	0.0405	1	0	0	0.040763	0.982524	0.001211	-0.001532
4	0.0454	1	0.03	0	0.045439	1.048041	0.028567	-.000729
5	0.0355	1.775	0.05	0.05	0.034507	1.69132	0.05448	0.05051
6	0.0375	2.083333	0.01	0.01	0.03695	2.115381	0.00915	0.011857
7	0.0375	1.388889	0.05	0	0.037001	1.387067	0.046689	-0.00234
8	0.045	1.956522	0.01	0.03	0.043863	1.98730	0.012207	0.03256
9	0.045	1.323529	0.03	0.03	0.043873	1.343246	0.031324	0.030073
10	0.0475	1.9	0	0	0.045835	1.88863	0.00645	0.002274
11	0.025	1	0.05	0.01	0.023524	0.921283	0.050114	0.008736
12	0.026	1	0.07	0	0.025619	0.961084	0.069587	-0.00017
13	0.027	1	0.03	0.05	0.024899	0.962125	0.029894	0.048097
14	0.0295	1	0.05	0.07	0.028879	0.92176	0.04969	0.06887
15	0.0296	1	0.01	0.01	0.0298	1.144904	0.011365	0.016991
16	0.03	1	0.03	0.03	0.029532	0.972384	0.030887	0.028033
17	0.0302	1	0.03	0.01	0.029504	0.964365	0.032824	0.00988
18	0.0302	1	0.04	0	0.030452	0.937243	0.03844	0.002041
19	0.032	1	0.01	0.03	0.033637	1.069595	0.010263	0.031912
20	0.0335	1	0.07	0	0.033538	1.077244	0.070757	0.002412
21	0.0345	1	0.05	0	0.034556	0.924577	0.048522	0.000552
22	0.0345	1	0.05	0.03	0.036044	1.003725	0.052328	0.029973
23	0.0355	1	0.01	0.05	0.034836	0.94419	0.008607	0.051645
24	0.0355	1	0.05	0.05	0.03548	0.983706	0.048356	0.049564
25	0.038	1	0.03	0	0.037904	0.90513	0.030997	0.000931
26	0.0385	1	0.03	0.05	0.039802	1.123352	0.030405	0.049949
27	0.0395	1	0.03	0.07	0.038308	1.006958	0.029877	0.69456
28	0.0398	1	0.03	0.01	0.039766	0.008465	0.031952	0.010289
29	0.0403	1	0.05	0.01	0.040458	1.028327	0.04943	-0.00035
30	0.0413	1	0.01	0.01	0.040527	0.987579	0.011886	0.00812
31	0.0402	1	0.05	0.01	0.040914	0.903645	0.051081	0.017065
32	0.0447	1	0.01	0.03	0.046052	1.117795	0.011051	0.029947
33	0.0485	1	0.03	0.03	0.048484	0.900129	0.029976	0.030052

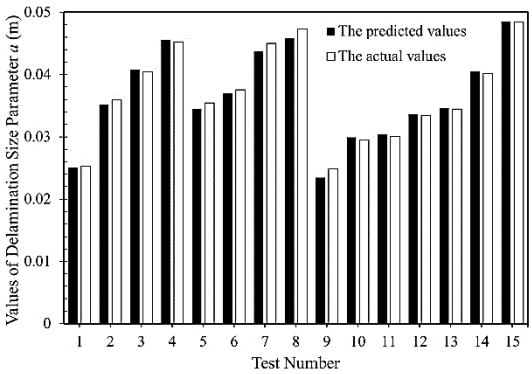

Fig. 16 Diagramed comparison of the network performance using Levenberg – Marquardt training method

شکل 16 مقایسه نموداری عملکرد شبکه با روش آموزش لونبرگ – مارکوآرت

شده الگوریتم پس انتشار خطا بسیار نزدیک به مقادیر حقیقی به‌دست آمده از نرم‌افزار آباکوس می‌باشند.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از مقادیر پیش‌بینی شده به روش آموزش لونبرگ – مارکوآرت که در "شکل 16" آورده شده است و مقادیر پیش‌بینی شده الگوریتم پس انتشار خطا که نتایج آن در جدول 12 نشان داده شده است، این نتایج بسیار نزدیک به مقادیر حقیقی به‌دست آمده از نرم‌افزار آباکوس می‌باشند. که این نتایج دقت پیش‌بینی شبکه عصبی را در پارامترهای مذکور نشان می‌دهد.

7- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله از الگوریتم پس انتشار خطا یا قانون دلتای تعمیم‌یافته برای پیش‌بینی آسیب جدایی بین‌لایه‌ای در ورق کامپوزیتی 8 لایه استفاده شد. این روش براساس کاهش گرادیان به‌منظور به حداقل رساندن کل مربعات خطای خروجی محاسبه شده توسط شبکه می‌باشد. نحوه پیش‌بینی آسیب به این صورت است که ابتدا تحلیل ارتعاشات آزاد ورق کامپوزیتی مذکور براساس روش عددی اجزای محدود انجام گرفت و فرکانس‌های طبیعی در مودهای خاص به ازای مدل‌های مختلفی از آسیب جدایی بین‌لایه‌ای (اندازه ، خروج از مرکزی و موقعیت) به‌دست آمد. سپس این فرکانس‌های طبیعی به عنوان ورودی و پارامترهای اندازه، هندسه و موقعیت نیز به‌عنوان خروجی شبکه عصبی درنظر گرفته شد. در واقع فرایند عیب‌یابی از نوعی روش معکوس برای شناسایی آسیب استفاده می‌کند. بعد از تولید داده برای سازه موردنظر، شبکه به گونه‌ای آموزش می‌بیند که با دقت قابل قبولی بتواند محل و اندازه و هندسه آسیب را تشخیص دهد. همچنین شبکه را نباید بیش از حد آموزش داد، چون در این صورت شبکه عمومیت خود را از دست می‌دهد و تبدیل به یک حافظه می‌شود و برای داده‌های جدید کارایی‌اش را از دست می‌دهد.

نتایج تحلیل عددی برای ورق کامپوزیتی 8 لایه با جدایی بین‌لایه‌ای نشان می‌دهد که با افزایش اندازه منطقه جدایی بین‌لایه‌ای و به نوعی با افزایش مساحت این ناحیه در یک موقعیت خاص، فرکانس‌های طبیعی کاهش می‌یابد. این کاهش در مودهای بالا بیشتر دیده می‌شود. البته با توجه به توزیع جرم و سختی و تغییر شکل منطقه جدایی بین‌لایه‌ای در موقعیت و

مودهای مختلف، استثناهایی نیز در مودهای بالا وجود دارد.

از دو روش آموزش لونبرگ – مارکوآرت و پس‌انتشار خطای انعطاف‌پذیر برای آموزش شبکه عصبی و مقایسه پاسخ‌ها استفاده شد. از روش آموزش لونبرگ-مارکوآرت نتایج بسیار دقیقی به‌دست آمد که با نتایج حاصل از تحلیل عددی تطابق خوبی دارد. بعد از آموزش شبکه، برای 33 داده، تست شبکه صورت گرفت که نتایج قابل قبولی را به همراه داشت.

8- مراجع

[1] S. Sridharan, *Delamination behavior of composites, Published by Woodhead Publishing and Maney Publishing on behalf of The Institute of Materials*, pp. 105-120, Minerals & Mining, Boca Raton Boston New York Washington: Elsevier, 2008.

[2] R. Krueger, P. J. Minguet, T. Kevin O'Brien, A method for calculating strain energy release rates in preliminary design of composite skin/stringer debounding under multi-axial loading, *Composite Structures: Theory and Practice*, Vol. 1383, No. 1, pp. 105-128, 2000.

[3] R. Krueger, P. J. Minguet, Analysis of composite skin–stiffener debound specimens using a shell/3D modeling technique, *Composite Structures*, Vol. 81, No. 1, pp. 41–59, 2007.

[4] H. Hosseini-Toudeshky, B. Mohammadi, B. Hamidi, H. R. Ovesy, Analysis of composite skin/stiffener debounding and failure under uniaxial loading, *Composite Structures*, Vol. 75, No. 1, pp. 428–436, 2006.

[5] S. Lauterbach, A. C. Orifici, W. Wagner, C. Balzani, H. Abramovich, R. Thomson, Damage sensitivity of axially loaded stringer-stiffened curved CFRP panels, *Composites Science and Technology*, Vol. 70, No. 2, pp. 240–248, 2010.

[6] W. Wagner, C. Balzani, Simulation of delamination in stringer stiffened fiber-reinforced composite shells, *Computers and Structures*, Vol. 86, No. 9, pp. 930–939, 2008.

[7] J. Bertolini, B. Castanié, J. J. Barrau, J. P. Navarro, Multi-level experimental and numerical analysis of composite stiffener debonding, Part 1: Non-specific specimen level, *Composite Structures*, Vol. 90, No. 4, pp. 381–391, 2009.

[8] H. T. Yang, C. C. He, Three-dimensional finite element analysis of free edge stresses and delamination of composite laminates, *Journal of Composite Materials*, Vol. 28, No. 15, pp. 1394-1412, 1994.

[9] O. S. Salawu, Detection of structural damage through changes in frequency: a review, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 19, No. 9, pp. 718-723, 1997.

[10] A. Rytter, P. H. Kirkegaard, Vibrational-based inspection of a steel mast, *Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference*, Hawaii, pp. 1602–1608, 1994.

[11] A. Gomes, J. Silva, On the use of modal analysis for crack identification, *Proceedings of the 8th International Modal Analysis Conference*, FL USA, pp. 1108–1115, 1991.

[12] P. Cawley, R. D. Adams, The location of defects in structure from measurements of natural frequencies, *Journal of Strain Analysis*, Vol. 4, No. 2, pp. 49-57, 1979.

[13] D. Sanders, Y. I. Kim, R. N. Stubbs, Non-destructive evaluation of damage in composite structures using modal parameters, *Experimental Mechanics*, Vol. 32, No. 3, pp. 240-251, 1992.

[14] R. Ceravolo, A. D. Stefano, Damage location in structure through a connectivistic use of FEM modal analyses, *Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, Vol. 10, No. 3, pp. 178-186, 1995.

[15] L. B. Crema, F. Mastroddi, Frequency-domain based approaches for damage detection and localisation in aeronautical structure, *Proceedings of the International Modal Analysis Conference*, Sem Societt for Experimental Mechanics inc, pp. 1322–1330, 1995.

[16] R. M. Gadelrab, The effect of delamination on the natural frequencies of a laminated composite beam, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 24, No. 3, pp. 283-292, 1996.

[17] K. Alnefaie, Finite element modeling of composite plates with internal delamination, *Composite Structures*, Vol. 90, No. 1, pp. 21-27, 2009.

[18] C. Harrison, R. Butler, Locating delaminations in composite beams using gradient techniques and a genetic algorithm, *Journal American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Vol. 39, No. 7, pp. 1383-1389, 2001.

[19] A. Nag, D. R. Mahapatra, S. Gopalakrishnan, Identification of delamination in composite beams using spectral estimation and a genetic algorithm, *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, No. 6, pp. 899-908, 2002.

[20] A. C. Okafor, K. Chandrashekhara, Y. P. Jiang, Delamination prediction in composite beams with built-in piezoelectric devices using modal analysis and neural network, *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, No. 3, pp. 338-347, 1996.

[21] A. S. Islam, K. C. Craig, Damage detection in composite structures using piezoelectric materials (and neural net), *Smart Materials and Structures*, Vol. 3, No. 3, pp. 318-328, 1994.

[22] S. J. Zheng, Z. Q. Li, H. T. Wang, A genetic fuzzy radial basis function neural network for structural health monitoring of composite laminated beams, *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, No. 9, pp. 11837-11842, 2011.

[23] L. Fausett, *Fundamentals of Neural Networks*, pp. 50-60, USA: Prentice-Hall, 1994.

[24] R. Butler, A. T. Rhead, W. Liu, N. Kontis, *Compressive strength of delaminated aerospace composites*, Composites Research Unit, Department of Mechanical Engineering, University of Bath, 2012.

[25] V. N. Burlayenko, T. Sadowski, FE modeling of delamination growth in interlaminar fracture specimens, *Budownictwo i Architektura*, Vol. 33, No. 2, pp. 95-109, 2008.

[26] L. H. Yam, Z. Wei, L. Cheng, W. O. Wong, Numerical analysis of multi-layer composite plates with internal delamination, *Computers and Structures*, Vol. 82, No. 7, pp. 627-637, 2004.

[27] M. A. Kouchakzadeh, S. Hideki, Compressive buckling analysis of rectangular composite laminates containing multiple delaminations, *Composite Structures*, Vol. 25, No. 3, pp. 249-255, 2000.

[28] L. Cheng, J. Nicolas, Free vibration analysis of a cylindrical shell circular plate system with general coupling and various boundary conditions, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 155, No. 2, pp. 231-247, 1992.

[29] J. Missaoui, L. Cheng, M. Richard, Free and forced vibration of a cylindrical shell with a floor partition, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 190, No. 1, pp. 21-40, 1996.

[30] S. K. Panda, B. Pradhan, Mixed-mode analysis of superimposed thermo-elastic effects in fiber-reinforced composites with embedded interface delaminations, *Composite Structures*, Vol. 77, No. 4, pp. 570-580, 2007.

[31] S. K. Panda, B. Pradhan, Thermoelastic analysis of the asymmetries of interfacial embedded delamination characteristics in laminated FRP composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, No. 2, pp. 337-347, 2007.

[32] S. K. Panda, B. Pradhan, The influence of ply sequence and thermoelastic stress field on asymmetric delamination crack growth behavior of embedded elliptical delaminations in laminated FRP composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 3, pp. 417-426, 2006.

[33] D. Lin, R. G. Ni, R. D. Adams, Prediction and measurement of the vibrational damping parameters of carbon glass fiber-reinforced plastics plates, *Journal of Composite Materials*, Vol. 18, No. 2, pp. 52-132, 1984.

[34] M. Manhaj, *Principles of Neural Networks*, pp. 25-36, Tehran: Amirkabir University of Technology, 2012. (in Persian فارسی)

[35] D. S. Nagesh, G. L. Datta, Prediction of weld bead geometry and penetration in shielded metal-arc welding using artificial neural networks, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 123, No. 2, pp. 303–312, 2002.