

عیب‌یابی ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای براساس انحناهای شکل مودها*

(یادداشت پژوهشی)

مرتضی صادقی^(۳)محمد زهساز^(۲)نیما جعفرزاده اقدم^(۱)

چکیده در حال حاضر مطالعات اندکی به عیب‌یابی لوله‌ها و پوسته‌های استوانه‌ای جدارنازک اختصاص یافته‌است. در سال‌های اخیر انحناهای شکل مودها به علت حساسیت بالا به عیب، مورد توجه محققان قرار گرفته‌است ولی این روش‌ها نیازمند داده‌برداری متراکم و اسکن ارتعاشی کل سطح می‌باشند که این موضوع استفاده صنعتی از این روش‌ها را بسیار محدود کرده‌است. در این پژوهش روش جدیدی برای عیب‌یابی پوسته‌های استوانه‌ای معرفی گردیده‌است که نیازمند داده سازه سالم نمی‌باشد و داده‌برداری صرفاً در سه راستای طولی پوسته انجام می‌شود. با انتقال اطلاعات آنالیز ارتعاشی سازه به شبکه عصبی، خروجی شبکه مکان دقیق عیب در سطح سازه خواهد بود و به تکنسین ماهر برای تفسیر داده‌ها نیاز ندارد. عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از ورودی‌های جدید و غیر آشنا برای شبکه، صحت سنجی گردید و میزان رگرسیون ۰/۹۷ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی پوسته استوانه‌ای، انحناهای شکل مود، تحلیل المان محدود، شاخص عیب، شبکه عصبی مصنوعی.

Damage Identification of Cylindrical Shells Based on Mode Shapes Curvature

N. Jafarzadeh Aghdam

M. Zehsaz

M. Sadeghi

Abstract Currently there are just a few papers about fault detection of tubes and cylindrical shells. Recently, methods based on modal curvatures have gained great attention due to their sensitivity to defects. But the methods require dense number of data extraction points which limits their industrial application. In this research a new method for damage identification of cylindrical shells has been introduced. The method does not need intact structure's data and in contrast to other methods requires a few data extraction points. By transferring the modal information of the structure to the ANN, output of the network is exact position of the defect on the structure and the method does not need skilled technician to interpret the data. Performance of the network is validated by unfamiliar data for the network and 0.97 regression is obtained.

Key Words Cylindrical Shell; Mode Shape Curvature; Finite Element Analysis; Damage Index; Artificial Neural Network

* تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۵/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۶/۱۱/۸ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v30i1.58045

(۱) دانشجوی دوره دکتری، مهندسی مکانیک، RWTH-Aachen University، آلمان. nima.aghdam@sla.rwth-aachen.de

(۲) استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز.

(۳) استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز.

مقدمه

بسیاری از سازه‌های موجود در صنایع را می‌توان به‌عنوان پوسته‌استوانه‌ای قلمداد نمود از جمله محفظه‌های فضایی، مخازن تحت فشار، بویلرها و غیره. با وجود کاربرد وسیع پوسته‌های استوانه‌ای مطالعات اندکی بر روی عیب‌یابی این سازه‌ها انجام شده است. شکست ناگهانی این سازه‌ها منجر به فجایع و ضررهای مالی و جانی جبران‌ناپذیری می‌شود. جلوگیری از شکست ناگهانی این سازه‌ها، نیازمند شناسایی عیوب سازه‌ای از جمله ترک‌ها، خوردگی و غیره در مراحل ابتدایی ایجاد آنها می‌باشد. روش‌های غیرمخرب بسیاری از جمله روش‌های فراصوت و اشعه ایکس برای سازه‌های ساده، توسعه یافته‌اند و مورد استفاده در صنایع می‌باشند. در اغلب موارد برای استفاده از این روش‌ها باید مکان تقریبی عیب مشخص باشد و همچنین این روش‌ها زمان‌بر هستند و مهم‌تر از همه نیازمند تکنسین‌های ماهر برای تفسیر داده‌های اخذ شده می‌باشند [1].

روش‌های دینامیکی از روش‌های کم‌هزینه به حساب می‌آیند و به علت قابلیت حمل تجهیزات آنها، در بحث عیب‌یابی به‌هنگام همواره از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده‌اند. در مبحث عیب‌یابی توسط مشخصات ارتعاشی سازه، استفاده از فرکانس‌های طبیعی با مشکلاتی مواجه است، زیرا در اثر بروز عیب میزان تغییرات فرکانس طبیعی کم است و همچنین تعیین مکان عیب توسط آن نیازمند استفاده از تکنیک‌های پیچیده می‌باشد. علاوه بر آن شرایط محیطی بر روی فرکانس‌های طبیعی سازه بسیار تأثیرگذار است [2]. ترابی و همکاران [3] روشی برای عیب‌یابی تیرهای کامپوزیتی با استفاده از فرکانس طبیعی اول تیر و به‌کارگیری یک تکیه‌گاه متحرک معرفی کرده‌اند. با جابه‌جا کردن تکیه‌گاه در طول تیر در هر مرحله مقدار فرکانس طبیعی اول سازه استخراج می‌گردد. با رسیدن تکیه‌گاه متحرک به محل عیب نوسان شدیدی در مقدار

فرکانس طبیعی اول دیده می‌شود. علی‌رغم دقت بالای روش در یافتن عیوب کوچک استفاده از این روش برای سازه‌های پیچیده‌تر مانند پوسته‌های استوانه‌ای با دشواری همراه است و روش برای عیب‌یابی در محل مناسب نمی‌باشد. روش دیگری بر پایه تغییرات فرکانس‌های طبیعی برای عیب‌یابی تیرهای کامپوزیتی توسط ترابی و همکاران [4] معرفی شده است. در این تحقیق نتایجی در مورد تأثیر عیب بر روی شکل مودها ارائه شده است. اما در بسیاری از موارد عیوب تغییرات شدیدی بر روی شکل مودها ایجاد نمی‌کنند و حتی با اندازه‌گیری تراکم بالا، شکل مودها حساسیت زیادی به عیوب نشان نمی‌دهند [5].

بسیاری از روش‌های عیب‌یابی دینامیکی نیازمند اطلاعات مربوط به سازه سالم برای تشخیص عیب هستند. اغلب دسترسی به اطلاعات سازه سالم امکان‌پذیر نمی‌باشد و این موضوع سبب عدم امکان استفاده از این روش‌ها در بسیاری از موارد شده است.

یکی دیگر از اشکالات مرتبط با روش‌های عیب‌یابی دینامیکی حساسیت کم نسبت به عیوب کوچک است [6]. با ابداع روش‌های عیب‌یابی مبتنی بر انحنای شکل مودها، حساسیت بالای این روش‌ها نسبت به عیوب توجه محققان را جلب نموده است. فن و کیائو [2] مرور جامعی از روش‌های عیب‌یابی بر اساس مشخصات ارتعاشی سازه ارائه کردند. در این پژوهش روش استفاده از انحنای شکل مودها روشی کارا در عیب‌یابی ارزیابی گردیده است. کیائو و همکاران [7] از سه روش مختلف مبتنی بر انحنای شکل مودها برای عیب‌یابی تیرها استفاده نموده‌اند. هی و همکاران [8] روشی مبتنی بر انحنای شکل مودها برای عیب‌یابی تیرهای کامپوزیتی معرفی کرده‌اند که با وجود محدودیت‌هایی قابلیت تشخیص عیوب متعدد و شدت آنها را دارد. کیائو و همکاران [1] در تحقیق دیگری از سه روش مختلف مبتنی بر انحنای شکل مودها برای عیب‌یابی صفحات کامپوزیتی استفاده

پس از اعمال الگوریتم عیب‌یابی برای آموزش شبکه عصبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. باتوجه به ویژگی یادگیری و تعمیم شبکه‌های عصبی، پس از آموزش شبکه، با داشتن اطلاعات آنالیز ارتعاشی مربوط به سه امتداد سازه واقعی، مکان‌یابی سریع عیب در تمام نقاط محیط پوسته استوانه‌ای امکان‌پذیر خواهد بود.

جدول ۱ مشخصات مکانیکی لوله مورد استفاده برای شبیه‌سازی

[11]

ضریب پواسون	چگالی (kg/m^3)	مدول لاستیک (GPa)
0.3	7850	210

جدول ۲ ابعاد لوله مورد استفاده برای شبیه‌سازی

اندازه (in)	طول لوله (m)	قطر بیرونی (mm)	ضخامت (mm)
8	0.8	219.08	7.04

شبیه‌سازی پوسته استوانه‌ای

با رجوع به استاندارد ای‌اس‌تی‌ام مربوط به ساخت لوله‌های بدون درز و باتوجه به کاربرد وسیع این لوله‌ها در صنایع پتروشیمی برای شبیه‌سازی از لوله فولادی (گرید B استفاده شد. این لوله‌ها در شرایط A106) کاری تحت فشار و دمای بالایی قرار می‌گیرند. مشخصات مکانیکی لوله در جدول (۱) و ابعاد لوله شده در جدول (۲) ذکر شده است. شرایط سازی شبیه آزاد برای مدل اعمال شده است. سردو تکیه‌گاهی با استفاده از ۵۲۰۰ المان پوسته ۴ نقطه‌ای دو انحنا، با زنی می‌شود. حداکثر طول المان ۱۰ میلی‌متر، مدل مش شده سازه نمایش داده زنی در شکل (۱) مدل مش شده است. برای استخراج فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها از روش لانکسوز استفاده می‌شود و ۱۳ شکل مود طبیعی اول سازه استخراج می‌گردد. (به علت اعمال شرایط مرزی دوسر آزاد، سازه دارای ۶ مود صلب می‌باشد). انتخاب شکل مود برای انجام آزمون

کردند. نویسندگان حساسیت بالای انحنای شکل مودها نسبت به بروز عیب را گزارش نموده‌اند. ژو و همکاران [9] روش جدیدی براساس انحنای شکل مود اصلی، میانگین و گاوسین برای عیب‌یابی ورق‌ها معرفی کرده‌اند که عملکرد خوبی در مقابل نویز دارد. این روش نیازمند اسکنر ارتعاشی کل سطح ورق می‌باشد.

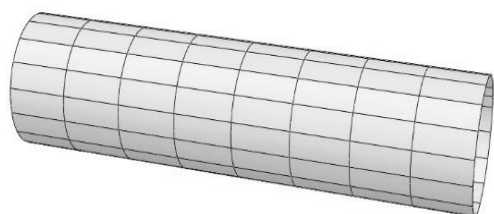
ژیانگ و همکاران [10] از روش ترکیبی انحنای شکل مودها و فرکانس‌های طبیعی برای مکان‌یابی و تخمین شدت عیب بر روی پوسته‌های مخروطی استفاده کردند. کاربرد روش مذکور بر روی پوسته‌های استوانه‌ای نیز بررسی شده است. در این روش از تبدیل موجک (Transform Wavelet) برای مکان‌یابی عیب استفاده شده است. علی‌رغم دقت بالای روش مذکور در مکان‌یابی عیب در طول پوسته، مکان‌یابی عیب بر روی محیط پوسته توسط این روش امکان‌پذیر نمی‌باشد.

در مقاله‌ای دسی و کامرلنگو [5] مرور جامعی بر روش‌های مبتنی بر انحنای شکل مودها داشتند و روش‌های مختلف را مقایسه کردند و معایب و مزایای هر یک را بیان نمودند.

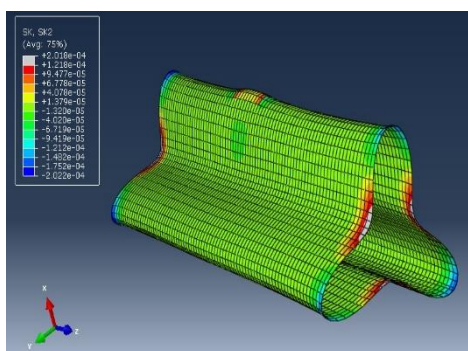
با بررسی ادبیات فن، یکی از مهم‌ترین نواقص موجود در روش‌های عیب‌یابی مبتنی بر انحنای شکل مودها، نیاز به اسکن و داده‌برداری از تمامی نقاط سطح سازه می‌باشد که این موضوع منجر به زمان‌بر بودن و در نتیجه نامناسب بودن روش‌های فوق برای مصارف صنعتی شده است. اندکی کاهش در تعداد نقاط مورد نیاز داده‌برداری سبب ارجحیت یافتن یک روش نسبت به سایر روش‌ها می‌گردد. در این تحقیق روش جدیدی برای عیب‌یابی پوسته‌های استوانه‌ای با استفاده از تجهیزات قابل حمل و با تعداد اندکی داده‌برداری معرفی گردیده است.

در پژوهش حاضر ابتدا پوسته استوانه‌ای در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی می‌شود، سپس با ایجاد عیب در قسمت‌های مختلف سازه مقادیر انحنای شکل مودها در سه راستا در طول سازه استخراج می‌گردد و

انحنای شکل مود طبیعی سازه به طور مستقیم قابل استخراج است. در صورت عدم دسترسی به داده های انحنای شکل مود، نیاز به استفاده از روش تقریب میانی بر داده های جابه جایی مودال برای استخراج داده های انحنای شکل مود می آید که این روش در مقاله [12] به طور کامل توضیح داده شده است. در شکل (۴) نمونه ای از مقادیر انحنای شکل مود بر روی سازه معیوب نشان داده شده است. تغییرات انحنای در اطراف منطقه معیوب قابل توجه است.



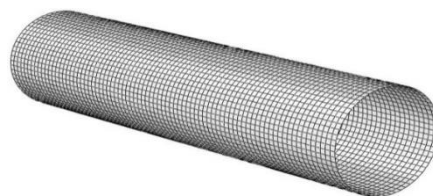
شکل ۳ مدل تقسیم بندی شده پوسته استوانه ای (طول مدل به ۸ حلقه و محیط پوسته به ۱۶ قسمت مساوی تقسیم بندی شده است)



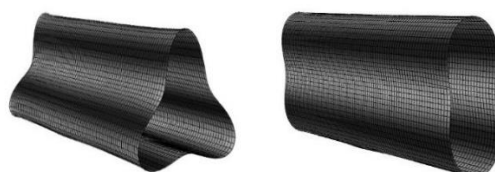
شکل ۴ کانتور میزان انحنای حاصل از تحلیل المان محدود (تغییرات انحنای در مکان عیب (حد فاصل ۳۰۰ الی ۴۰۰ میلی متری طول پوسته) مشهود است)

استخراج نتایج شبیه سازی المان محدود. طبق روش پیشنهادی در این پژوهش؛ برای کاهش تعداد نقاط مورد نیاز داده برداری، صرفاً در نقاط واقع بر راستای سه امتداد و به فاصله ۱۲۰ درجه از یکدیگر مقادیر انحنای شکل مودها استخراج می گردد (شکل ۵). به منظور

عیب یابی، در میزان حساسیت روش تأثیر به سزایی دارد. در صورت قرارگیری عیب بر روی نقاط اکسترمم شکل مود، امکان شناسایی عیب بیشتر است. به منظور افزایش حساسیت روش عیب یابی از مجموع داده های انحنای شکل مود مربوط به دو مود هفتم (۱۳۰۸)، برای $(9/61 \text{ Hz})$ و سیزدهم (Hz) عیب یابی استفاده می شود (شکل ۲).



شکل ۱ مدل مش زنی شده پوسته استوانه ای



الف ب

شکل ۲ الف) شکل مود ارتعاشی هفتم پوسته استوانه ای
ب) شکل مود ارتعاشی سیزدهم پوسته استوانه ای

شبیه سازی عیب. خوردگی یکی از متداول ترین نوع عیوب مربوط به لوله ها و مخازن است. برای شبیه سازی عیب، طول لوله شبیه سازی شده، به ۸ حلقه برابر و محیط آن با استفاده از خطوط طولی به ۱۶ قسمت تقسیم بندی می شود؛ به این ترتیب در مجموع سطح لوله به ۱۰۸ قسمت تقسیم می شود (شکل ۳). مقدار ضخامت پوسته $7/04$ میلی متر اعمال می گردد. برای شبیه سازی عیب خوردگی، مقدار ضخامت یکی از ۱۰۸ قسمت سطح به اندازه ۲ میلی متر کاهش داده می شود. با این روش شبیه سازی عیب، نیاز به مش زنی مجدد سازه نمی باشد که این امر در بحث مقایسه نتایج حاصل شده بسیار حائز اهمیت است زیرا ایجاد هرگونه تغییر در مش ها باعث تغییر نتایج تحلیل المان محدود خواهد شد. با توجه به قابلیت های نرم افزار آباکوس،

بر روی تیرها انجام داده‌اند [7]، نویسندگان اعلام کرده‌اند که روش انرژی کرنشی و روش صافی سطح شکاف‌دار نتایج بهتری داشته‌است. به‌خصوص در طی آزمایش تجربی عملکرد بهتر روش‌های مذکور مشهود است. در پژوهش حاضر نیز با انتقال داده‌های انحنای شکل مود به محیط نرم‌افزار متلب از روش صافی سطح شکاف‌دار برای عیب‌یابی استفاده شده‌است. در این روش با برازش موضعی منحنی چندجمله‌ای درجه سه به مقادیر انحنای نقاط هم‌جوار هر نقطه و محاسبه اختلاف آن با انحنای همان نقطه، شاخص عیب محاسبه می‌گردد. مفهوم انحنای معکوس شعاع انحنای می‌باشد. برای مثال مقدار انحنای مربوط به المان i ام؛ C_i در مکان x_i در طول سازه با استفاده از برازش منحنی از رابطه (۱) به دست می‌آید:

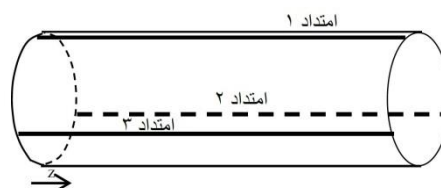
$$C_i = a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3 \quad (1)$$

که در این رابطه مقادیر ضرایب؛ a_3, a_2, a_1, a_0 با برازش منحنی درجه سه بر روی مقادیر انحنای شکل مود مربوط به دو نقطه قبل و بعد از نقطه i ام؛ $(C_{i-2}, C_{i-1}, C_{i+1}, C_{i+2})$ محاسبه می‌گردد. برای نقطه اول از داده‌های C_2, C_3, C_4, C_5 و برای نقطه دوم از داده‌های نقاط C_1, C_3, C_4, C_5 استفاده می‌شود. روال مشابه برای محاسبه انحنای در دو نقطه آخر اتخاذ می‌گردد. شاخص عیب هر نقطه، تفاضل مقدار محاسبه شده از طریق برازش منحنی و مقدار واقعی انحنای نقطه مورد نظر می‌باشد. مقدار شاخص عیب هر نقطه از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد:

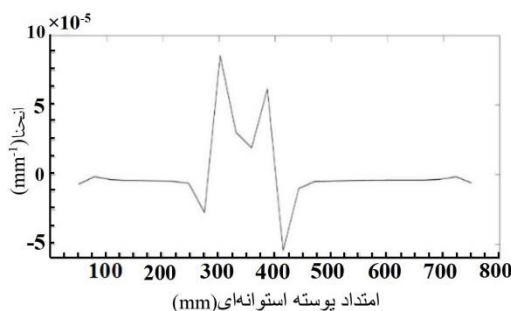
$$\delta_i = (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3) - C_i \quad (2)$$

برای هر یک از نقاط واقع بر سه امتداد داده‌برداری، مقدار شاخص عیب محاسبه می‌گردد و نمودار مقادیر شاخص عیب در سه امتداد طول سازه

نزدیک کردن روش المان محدود به روش داده‌برداری تجربی، در هر یک از سه امتداد، صرفاً در ۲۶ نقطه (به فاصله ۲۸ میلی‌متر) داده‌ها استخراج می‌شود. نقطه آغازین و انتهایی داده‌برداری (نقطه ۱ و ۲۶) در فاصله ۵۰ میلی‌متری از دو انتهای لوله واقع شده‌اند. نمونه‌ای از نمودار انحنای شکل مود سازه معیوب در شکل (۶) نشان داده شده‌است.



شکل ۵ امتداد سه مسیر داده‌برداری در طول پوسته استوانه‌ای



شکل ۶ نمودار تغییرات انحنای حاصل از تحلیل المان محدود (مکان عیب در مسیر امتداد دوم داده‌برداری و بر روی حلقه چهارم، حد فاصل ۳۰۰ الی ۴۰۰ میلی‌متری در طول پوسته)

استفاده از الگوریتم عیب‌یابی

در دهه اخیر تعداد زیادی از محققان توجه خویش را به ابداع الگوریتم‌های عیب‌یابی بر پایه انحنای شکل مودها معطوف داشته‌اند. تقریباً در تمام مقالات با استفاده از روش‌های تجربی و عددی کارایی روش پیشنهاد شده صحت‌سنجی شده‌است. کیانو و همکاران مقایسه‌ای بین سه روش معروف مبتنی بر انحنای شکل مود؛ ابعاد انکساری تعمیم‌یافته (Generalized Fractal Dimension)، روش انرژی کرنشی و روش صافی سطح شکاف‌دار (Gapped Smoothing Method)

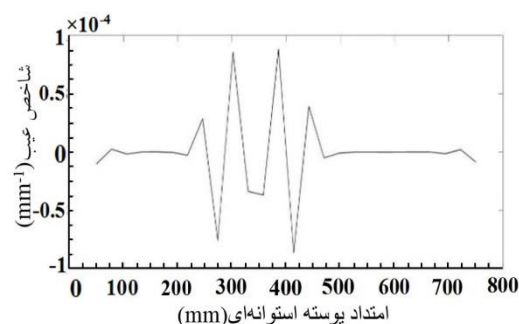
استفاده شده است. این شبکه برای برازش منحنی بسیار متداول است. در شبکه‌های عصبی مورد استفاده در پژوهش حاضر تابع تبدیل لایه‌های مخفی تانژانت هیپربولیک می‌باشد. الگوریتم آموزش پس‌انتشار برای شبکه‌های چندلایه، بر پایه الگوریتم مینیمم خطای مربعات می‌باشد و روش آموزش، نظارتی به حساب می‌آید که در آن آموزش از طریق مجموعه‌ای از داده‌های آموزشی انجام می‌گیرد. روش پس‌انتشار مشابه با روش مینیمم خطای مربعات از شاخص عملکرد میانگین مربع خطا استفاده می‌کند [14]. برای آموزش سریع شبکه‌های عصبی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی عددی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش از الگوریتم بهینه‌سازی لونبرگ مارکوارد (Levenberg Marquardt optimization) استفاده شده است.

دسته‌بندی داده‌های ورودی به شبکه عصبی از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا که به طور مستقیم بر میزان انطباق و رگرسیون شبکه تأثیرگذار است.

به منظور به دست آوردن داده‌های لازم برای آموزش شبکه عصبی، ضخامت یکی از قسمت‌های روی پوسته استوانه‌ای ۲ میلی‌متر کاهش داده می‌شود. در این پژوهش پوسته شبیه‌سازی شده، مشتمل بر ۸ حلقه به ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر است که حلقه ابتدایی و انتهایی به جهت نزدیکی به شرایط مرزی مدنظر عیب‌یابی نمی‌باشند (شکل ۳). مکان عیب بر روی قسمت‌های واقع بر حلقه دوم تا حلقه هفتم (فاصله ۱۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌متری طول پوسته) جابه‌جا می‌شود و در ۹۶ مکان مختلف عیب، مقادیر انحنای شکل مود نقاط در مودهای ارتعاشی هفتم و سیزدهم استخراج می‌گردد. در هر امتداد، داده‌برداری از ۲۶ نقطه در طول پوسته انجام شده است. که در مجموع برای یک مکان مشخص عیب، برای هر یک از مودهای ارتعاشی، ۳ ماتریس ۲۶ در ۱ استخراج گردیده است. تمامی داده‌های مربوط به انحنا به نرم‌افزار متلب منتقل می‌شود و پس از به دست آوردن شاخص‌های عیب، هر یک از ماتریس‌ها، نرمال‌سازی می‌شود و قدر مطلق آنها ثبت

به دست می‌آید.

نمونه‌ای از نمودار شاخص عیب؛ محاسبه شده به روش صافی سطح شکافدار، در شکل (۷) نشان داده شده است. باتوجه به مکان بروز عیب و فاصله هر یک از امتدادهای داده‌برداری از مکان عیب، میزان شاخص عیب در طول سه امتداد داده‌برداری متفاوت می‌باشد. در ادامه از این موضوع برای آموزش شبکه عصبی به منظور تشخیص مکان عیب در تمام نقاط محیط پوسته استفاده می‌شود.



شکل ۷ نمودار شاخص عیب به طول پوسته استوانه‌ای - مکان عیب در مسیر امتداد دوم داده‌برداری و بر روی حلقه ۴ام (حد فاصل ۳۰۰ الی ۴۰۰ میلی‌متری پوسته)

شبکه عصبی

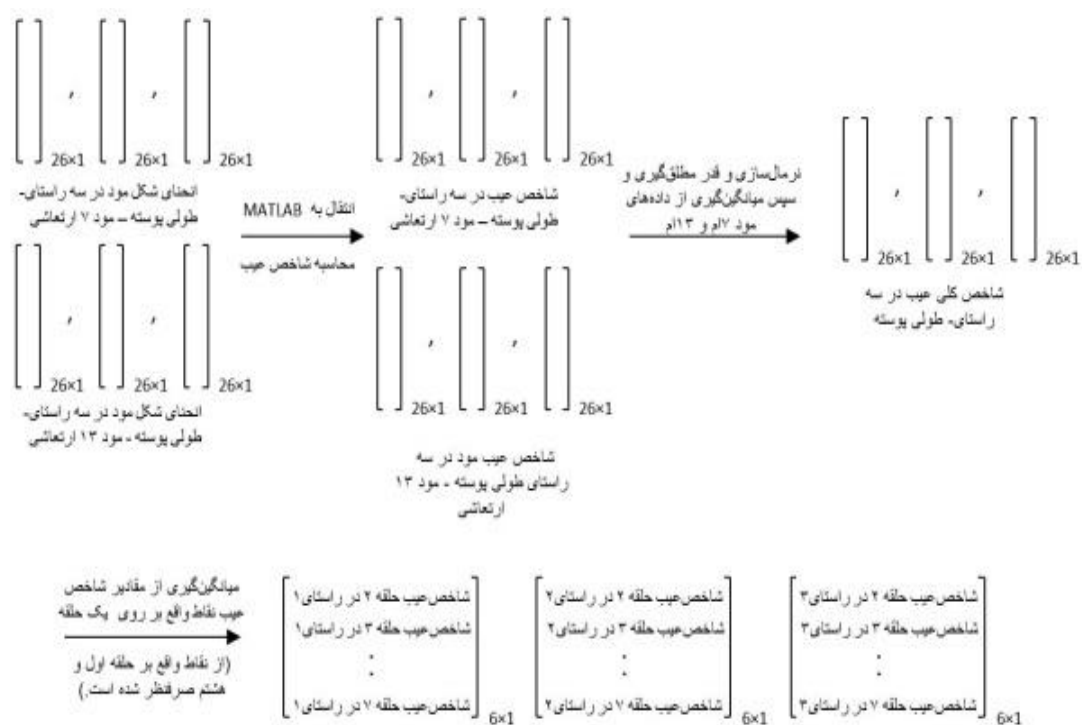
شبکه‌های عصبی به عنوان مدل‌های ساده‌سازی شده بر پایه نحوه یادگیری بیولوژیکی مغز انسان توسعه یافته‌اند. یک شبکه عصبی مصنوعی شامل تعدادی نورون‌های پردازنده می‌باشد که به یکدیگر متصل‌اند و در یک لایه از شبکه جمع شده‌اند. با وجود روش‌های معدود محاسباتی، تعداد لایه‌های مخفی و تعداد نورون‌های هر لایه مخفی اغلب با استفاده از روش آزمون و خطا تعیین می‌گردد [13]. شبکه‌های عصبی توانمندی بالایی در برازش منحنی بر روی داده‌ها دارند. شبکه‌های چند لایه با داشتن تعداد نورون کافی، قابلیت برازش منحنی بر روی هر مجموعه داده‌ای را دارند [14]. در این پژوهش از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه؛ که یک شبکه پیشخور محسوب می‌شود

عصبی مجزا برای مکان‌یابی دقیق عیب در طول و محیط پوسته استفاده می‌گردد.

آموزش شبکه عصبی برای مکان‌یابی عیب در طول پوسته استوانه‌ای. برای هر حالت بروز عیب، مقادیر شاخص عیب (سه ماتریس ۶ در ۱) مرتبط با هر امتداد با یکدیگر جمع ماتریسی می‌شود. نتیجه یک ماتریس ۶ در ۱ است که هر یک از اعضای ماتریس مقدار شاخص عیب کلی مرتبط با هر حلقه می‌باشد. از این ماتریس به‌عنوان ورودی شبکه استفاده می‌شود. این شبکه دارای یک خروجی مرتبط با مکان طولی عیب می‌باشد. با نزدیک شدن مکان عیب به یک حلقه، عدم صافی سطح بر روی نوده‌های واقع بر این حلقه محسوس‌تر می‌شود و شاخص عیب این حلقه بیشتر از حلقه‌های جانبی خواهد بود. شبکه عصبی با یادگیری رفتار و تغییرات مقادیر شاخص عیب‌ها الگویی از نحوه تغییرات ایجاد می‌کند و قابلیت مکان‌یابی عیب در کل طول پوسته استوانه‌ای را خواهد داشت.

می‌گردد. سپس مقادیر شاخص‌های عیب مرتبط با مود هفتم و سیزدهم میانگین‌گیری می‌شود که در نتیجه برای هر حالت بروز عیب ۳ ماتریس ۲۶ در ۱ شاخص عیب، مرتبط با سه امتداد داده‌برداری محاسبه می‌گردد. با صرف‌نظر کردن از حلقه‌های شماره ۱ و ۸ پوسته، هر یک از امتدادهای داده‌برداری از ۶ حلقه محیطی پوسته عبور می‌کند. درمورد هر یک از امتدادهای داده‌برداری، از مقادیر شاخص عیب ۲۶ نقطه داده‌برداری، مقادیر شاخص عیب نقاطی که بر روی یک حلقه واقع شده‌اند میانگین‌گیری می‌شود و برای هر امتداد یک مقدار مشخص شاخص عیب مرتبط با هر حلقه (ماتریس ۶ در ۱) به دست می‌آید. و درنهایت برای هر مکان عیب ۳ ماتریس ۶ در ۱ شاخص عیب حاصل می‌گردد. مراحل محاسبه داده‌ها برای آموزش شبکه عصبی در شکل (۸) نیز ارائه شده‌است.

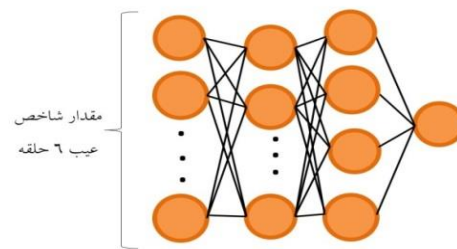
کاهش تعداد مشخصه‌های ورودی به شبکه عصبی، به علت کاهش پیچیدگی شبکه، سبب افزایش میزان انطباق شبکه می‌شود. بدین منظور از دو شبکه



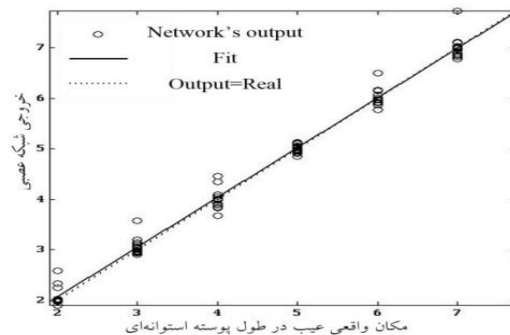
شکل ۸. مراحل آماده‌سازی داده‌های تحلیل المان محدود برای آموزش شبکه عصبی

آموزش شبکه عصبی برای مکان‌یابی عیب در محیط پوسته استوانه‌ای. برای این شبکه، یک مقدار (عدد) به عنوان شاخص عیب برای هر یک از سه امتداد داده‌برداری مرتبط می‌گردد. برای هر حالت بروز عیب، اعضای ماتریس ۶ در ۱ مرتبط با یک امتداد (مقادیر شاخص عیب) با یکدیگر جمع جبری می‌شوند و مقدار شاخص عیب کلی مربوط به آن امتداد به دست می‌آید. مقادیر شاخص عیب سه امتداد در نهایت به صورت یک ماتریس ۳ در ۱ ثبت می‌گردند. از ماتریس مذکور به عنوان ورودی شبکه دوم استفاده می‌شود. شبکه دارای یک خروجی مرتبط با مکان قرارگیری عیب در محیط حلقه معیوب می‌باشد. در صورت قرار گرفتن عیب بین دو امتداد، مقادیر شاخص عیب مرتبط به این دو امتداد بیش از امتداد سوم (امتداد دورتر) به دست می‌آید. با نزدیک شدن مکان عیب به هر یک از امتدادهای داده‌برداری، عدم صافی سطح ناشی از حضور عیب بر روی نودهای این امتداد محسوس‌تر خواهد بود و مقدار شاخص عیب مرتبط با این امتداد بیشتر است. شبکه عصبی با یادگیری رفتار و تغییرات مقادیر شاخص عیب‌ها الگویی از نحوه تغییرات ایجاد می‌کند و پس از آموزش همانند جعبه سیاهی عمل می‌کند و با دریافت ماتریس عیب امتدادها، مکان عیب را در کل محیط پوسته استوانه‌ای تشخیص می‌دهد. با توجه به قدرت برآزش شبکه عصبی، شبکه قدرت تشخیص مکان عیوب غیر آشنا برای شبکه را نیز دارا است. طبق روال شبکه عصبی پیشین تعداد داده‌های موجود به طور اتفاقی به سه دسته آموزش، صحت‌سنجی و آزمون تقسیم می‌شود. با روش آزمون و خطا تعداد بهینه لایه‌ها و نورون‌های لایه‌های مخفی به دست می‌آید. برای هر پیکربندی مشخص شبکه ۴۰ شبکه عصبی آموزش داده می‌شود و با بررسی میانگین عملکرد شبکه‌ها شبکه

از ۹۶ داده موجود ۶۶ داده برای آموزش شبکه و ۱۵ داده برای صحت‌سنجی و ۱۵ داده برای آزمون شبکه به طور اتفاقی انتخاب شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با روش آزمون و خطا تعداد بهینه لایه‌ها و نورون‌های لایه‌های مخفی به دست می‌آید. برای هر پیکربندی مشخص شبکه ۴۰ شبکه عصبی آموزش داده می‌شود و با میانگین‌گیری از عملکرد شبکه‌ها و مقایسه نتایج، بهترین پیکربندی شبکه استخراج می‌گردد. شبکه عصبی سه لایه با ۵ نورون در لایه اول و ۴ نورون در لایه دوم بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. برای پیکربندی ذکر شده، میزان رگرسیون برای داده‌های آموزشی ۰/۹۹۷، داده‌های صحت‌سنجی ۰/۹۹۲ و داده‌های آزمون ۰/۹۹ است و رگرسیون برای مجموع کل داده‌ها ۰/۹۹۵ می‌باشد. در شکل (۹) تصویر پیکربندی شبکه و در شکل (۱۰) نمودار رگرسیون شبکه برای داده‌های آزمون آمده است.



خروجی لایه مخفی لایه مخفی ورودی
شکل ۹ پیکربندی شبکه عصبی برای مکان‌یابی عیب در طول پوسته استوانه‌ای



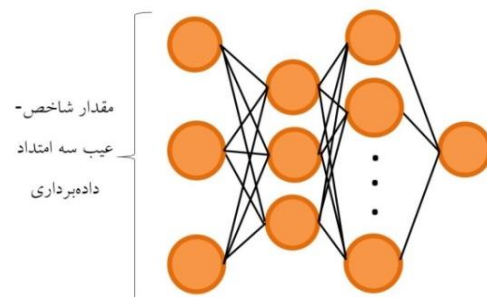
شکل ۱۰ نمودار رگرسیون برای کل داده‌های ورودی به جهت تعیین عیب در طول پوسته (مقدار خطای داده‌های آزمون برابر با ۰/۹۹ است)

معرفی شده‌است. تعداد بالای نقاط موردنیاز برای داده‌برداری و نیاز به اسکنر ارتعاشی از معایب عمده روش‌های عیب‌یابی برپایه انحنای شکل مودها می‌باشد. روش معرفی‌شده با هدف کاهش تعداد نقاط داده‌برداری و افزایش سرعت عیب‌یابی برای کاربردی کردن روش عیب‌یابی در جهت مصارف صنعتی طراحی گردیده‌است.

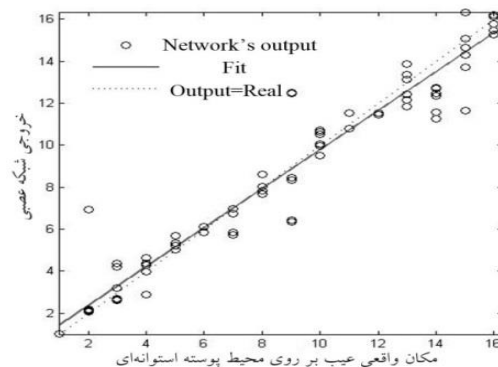
در این پژوهش با شبیه‌سازی پوسته جدارنازک توسط نرم‌افزار آباکوس و ایجاد عیب بر روی مدل، داده‌های مربوط به انحنای شکل مود در سه راستای طولی لوله استخراج گردید. عیب بر روی سطح سازه جابه‌جا شد و داده‌های مربوط به انحنا در هر مرحله استخراج شدند. با تحلیل داده‌ها با استفاده از روش عیب‌یابی صافی سطح شکاف‌دار، مقادیر شاخص عیب برای هر راستا محاسبه گردید. از مقادیر شاخص عیب جهت آموزش شبکه عصبی استفاده شد. به منظور کاهش پیچیدگی شبکه و در نتیجه افزایش قدرت شبکه در برازش منحنی، از دو شبکه عصبی مستقل که به طور موازی با هم عمل می‌کنند جهت مکان‌یابی عیب استفاده گردید. با برازش منحنی بر داده‌ها، میزان انطباق بالایی مشاهده شد. مقدار رگرسیون شبکه‌های عصبی برای داده‌های غیرآشنای شبکه (داده‌های آزمون) به جهت مکان‌یابی عیب در طول و محیط پوسته استوانه‌ای به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۷۸ به دست آمد. با استفاده از روش پیشنهادی این پژوهش و باتوجه به قدرت یادگیری و تعمیم شبکه‌های عصبی، با داشتن داده‌های مربوط به انحنای شکل مود در سه راستای طولی پوسته استوانه‌ای، امکان تشخیص و مکان‌یابی سریع عیب در کل نقاط سازه مقدور می‌شود. استفاده هم‌زمان از دو شکل مود میزان دقت روش عیب‌یابی را افزایش داده‌است.

پس از یک مرتبه آموزش شبکه عصبی برای یک سازه مشخص، عیب‌یابی در طول عمر سازه به سرعت انجام می‌شود. خروجی شبکه مکان دقیق عیب است و نیاز به تکنسین ماهر برای تفسیر داده‌ها نمی‌باشد. در مورد سازه‌های فضایی به علت ظرفیت بسیار محدود

عصبی سه‌لایه، با ۳ نورون در لایه اول و ۵ نورون در لایه دوم بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. میزان رگرسیون برای داده‌های آموزشی ۰/۹۶۹، داده‌های صحت‌سنجی ۰/۹۷۸ و داده‌های آزمون ۰/۹۷۸ است و میزان رگرسیون برای مجموع کل داده‌ها ۰/۹۷ می‌باشد. در شکل (۱۱) تصویر پیکربندی شبکه و در شکل (۱۲) نمودار رگرسیون شبکه برای داده‌های آزمون آمده‌است.



شکل ۱۱ پیکربندی شبکه عصبی برای مکان‌یابی عیب در محیط پوسته استوانه‌ای



شکل ۱۲ نمودار رگرسیون برای کل داده‌های ورودی به جهت تعیین عیب در محیط پوسته (مقدار خطا کل داده‌های آزمون برابر با ۰/۹۷۸ است)

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر روش جدیدی براساس انحنای شکل مودها برای عیب‌یابی پوسته‌های جدارنازک

تجربه می‌کنند از اهمیت بالایی برخوردار است. در روش پیشنهادی مقاله، در لحظه عیب‌یابی، سازه صرفاً با خود مقایسه می‌شود و شاخص عیب نقاط محاسبه می‌گردد و شرایط محیطی بر روی روش کاملاً بی‌تأثیر است. در پژوهش‌های آتی نویسندگان به بررسی تجربی این روش خواهند پرداخت.

انرژی برای پردازش و همچنین ظرفیت محدود ذخیره‌سازی اطلاعات با بهره‌گیری از نتایج تحقیق حاضر و باتوجه به سرعت بالای پردازش در شبکه‌های عصبی، دیگر نیاز به ذخیره‌سازی و ارسال داده‌ها به زمین برای تحلیل نمی‌باشد. از طرفی عدم نیاز به داده‌های سازه سالم برای مقایسه، به‌خصوص برای سازه‌های فضایی که تغییرات درجه حرارت بالایی را

مراجع

1. Qiao, P., Lu, K., Lestariand, W. and Wang, J. "Curvature Mode Shape-based Damage Detection in Composite Laminated Plates", *Composite Structures*, Vol. 80, No. 3, pp. 409-428, (2007).
2. Fan, W. and Qiao, P., "Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study", *Structural Health Monitoring*, Vol. 10, No. 1, pp. 83-111, (2011).
3. Torabi, K., Shariati-Nia, M. and Heidari-Rarani, M., "Moving Support Technique for Delaminatoin Detection in Laminated Composite Beams Using the First Natural Frequency", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, pp. 1116-1128, 0731684417703489, (2017).
4. Torabi, K., Shariati-Nia, M. and Heidari-Rarani, M., "Experimental and Theoretical Investigation on Transverse Vibration of Delaminated Cross-ply Composite Beams", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 115, pp. 1-11, (2016).
5. Dessi, D. and Camerlengo, G., "Damage Identification Techniques Via Modal Curvature Analysis: Overview and Comparison", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 52, pp. 181-205, (2015).
6. Giurgiutiu, V., "Structural Health Monitoring (SHM) of Aerospace Composites", *Polymer Composites in the Aerospace Industry*, pp. 449-507, (2015).
7. Qiao, P., Lestari, W., Shah, M.G. and Wang, J. "Dynamics-based Damage Detection of Composite Laminated Beams Using Contact and Noncontact Measurement Systems", *Journal of Composite Materials*, Vol. 41, No. 10, pp. 1217-1252, (2007).
8. He, M., Yang, T. and Du, Y., "Nondestructive Identification of Composite Beams Damage Based on the Curvature Mode Difference", *Composite Structures*, Vol. 176, pp. 178-186, (2017).
9. Xu, Y., Zhu, W. and Smith, S., "Non-model-based Damage Identification of Plates Using Principal, Mean and Gaussian Curvature Mode Shapes", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 400, pp. 626-659, (2017).
10. Xiang, J., Matsumoto, T., Wang, Y. and Jiang, Z., "Detect Damages in Conical Shells Using Curvature Mode Shape and Wavelet Finite Element Method", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 66, pp. 83-93, (2013).
11. ASTM A106 / A106M, Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2010), www.astm.org
12. Ratcliffe, C.P., "A Frequency and Curvature Based Experimental Method for Locating Damage in Structures", *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 122, No. 3, pp. 324-329, (2000).
13. Paya, B., Esat, I. and Badi, M., "Artificial Neural Network Based Fault Diagnostics of Rotating Machinery Using Wavelet Transforms as a Preprocessor", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 11, No. 5, pp. 751-765, (1997).
14. Hagan, M.T., Demuth, H.B. and Beale, M.H., "Neural Network Design", Pws Pub. Boston, (1996).