



افزایش پایداری به نویز در شناسایی پارامترهای عیب تورق در صفحات کامپوزیتی با استفاده از روش هیبریدی

محمد رضا آشوری^۱، احمد قاسمی قلعه بهمن^{۲*}، محمد جواد کوبی^۳

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

۳- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

* سمنان، صندوق پستی ۱۹۱۱۱-۳۵۱۳۱، ghasemi@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۹۵/۳/۱۰	روش‌های ارتعاشی از جمله روش‌های مرسوم عیب‌یابی غیرمخرب برای شناسایی پارامترهای عیب است. یکی از مهم‌ترین مشکلات استفاده از روش‌های عیب‌یابی ارتعاشی، حساسیت پایین آن‌ها در حضور نویز می‌باشد. در کار حاضر روش عیب‌یابی هیبریدی برای افزایش پایداری نسبت به نویز ارائه شده است. بدین صورت که ابتدا ناحیه اولیه عیب توسط تبدیل ویولت شناسایی شده و سپس با استفاده از روش بروزرسانی مدل المان محدود مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، پارامترهای کمی عیب شناسایی می‌شوند. از سیگنال نسبت انرژی کرنشی در دو حالت سالم و معیوب برای شناسایی اولیه و تقریبی محل عیب توسط تبدیل ویولت و از سیگنال اختلاف انرژی کرنشی به‌عنوان تابع خطا در فرآیند بروزرسانی استفاده شده است. با استفاده از این روش علاوه بر افزایش میزان پایداری نسبت به نویز، حجم محاسبات به‌میزان چشم‌گیری کاهش می‌یابد. در این فعالیت به مقایسه پایداری نسبت به نویز در دو روش بروزرسانی کلاسیک و روش هیبریدی مبتنی بر ویولت و بروزرسانی پرداخته شده است. نمونه مورد بررسی مدل المان محدود صفحه کامپوزیتی چند لایه با عیب تورق می‌باشد.
پذیرش: ۹۵/۵/۶	
کلیدواژه‌ها:	
صفحه کامپوزیتی	
عیب‌یابی	
ویولت	
بروزرسانی مدل	
نویز	

Increasing robustness of solution to noise for identifying delamination damage in composite plates using a hybrid method

Mohammad-Reza Ashory, Ahmad Gasemi-ghalebahman*, Mohammad-Javad Kokabi

Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
 *P.O.B. 35131-19111, Semnan, Iran, ghasemi@semnan.ac.ir

Keywords	Abstract
Composite plate Damage detection Wavelet Strain energy Noise	Vibrational methods is one of the common nondestructive damage detection methods for detecting the damage parameters. The most important problem of these methods is their low sensitivity to detect the damage in the presence of noise. In this article, a hybrid damage detection method has been studied to increase the robustness of vibrational method to noise. First, the primary damage location has been detected by the wavelet transform. Next, all the damage parameters including location, depth and intensity of damage have been identified by the model updating process based on the Genetic Algorithm. The signal based on the strain energy ratio in intact and damaged states has been examined to primarily and approximately detect the location of damage thought applying wavelet transform. Also the selected error function in the updating process is based on the strain energy difference between these two states. Using the proposed method leads to raise level of robustness in the presence of noise, also the solution performs faster than the prior methods with the less computational cost. In this work, the solution robustness against noise in traditional model updating method and the proposed hybrid method based on the wavelet transform and updating process has been compared together. The case study has been the laminated composite plate with the delamination damage.

۱- مقدمه
 استفاده از روش‌های ارتعاشی برای عیب‌یابی غیرمخرب سازه‌ها با توجه به سهولت و هزینه مناسب آن به‌طور وسیعی در علوم مکانیک، هوافضا و عمران مورد توجه قرار گرفته است. این روش‌ها عمدتاً مبتنی بر خواص مودال سازه در دو حالت سالم و معیوب می‌باشند. از جمله مشکلات عمده در استفاده از این داده‌ها وجود نویز اندازه‌گیری به خصوص در داده‌های شکل مود می‌باشد.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:
 Ashory, M. R. Gasemi-ghalebahman, A. and Kokabi, M. J., "Increasing robustness of solution to noise for identifying delamination damage in composite plates using a hybrid method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 2, pp. 125-134, 2017.

یک روش ماتریس بهینه^۹ و تکنیک کاهش و بسط هیبریدی مقادیر ویژه^{۱۰} موقعیت کلی عیب را شناسایی نموده و در گام بعد با استفاده از روش پایه حساسیت^{۱۱} محل دقیق عیب را استخراج نمودند. پررا و رویز^{۱۲} نیز برای شناسایی عیب از یک فرآیند بروزرسانی چند مرحله استفاده نمودند. از طرفی بسیاری از محققان نیز به بررسی تاثیر نویز در روند عیب‌یابی پرداختند. از این دست می‌توان به فعالیت کوالینی^{۱۳} و همکاران [۱۰]، رودریگز^{۱۴} و همکاران [۱۱] و لی^{۱۵} [۱۲] اشاره نمود. در این مقاله، به ارائه یک روش هیبریدی عیب‌یابی توسط بروزرسانی مدل المان محدود ارائه شده است. در این روش با محدود نمودن ناحیه بروزرسانی توسط تبدیل ویولت، پایداری به نویز نسبت به روش کلاسیک بروزرسانی مدل المان محدود افزایش یافته است.

۲- تبدیل ویولت

برای اولین بار جوزف فوریه^{۱۶} در قرن نوزدهم در زمینه ویولت فعالیت داشته است [۱۳]. فوریه با تئوری آنالیز فرکانسی مبنای تئوری ویولت را پایه گذاری کرد، ولی در کل از دیدگاه تاریخی آنالیز ویولت مربوط به دهه‌های اخیر می‌باشد [۱۴]. نخستین عبارت موجک در سال ۱۹۰۹ در گزارشات آلفرد هار^{۱۷} ثبت شده است. مفهوم موجک در شکل تئوری زمان حاضر بوسیله جین مورلت^{۱۸} ژئوفیزیکدان فرانسوی پیشنهاد شده است [۱۵، ۱۶].

تئوری موجک برای غلبه بر مشکلات تبدیل فوریه ارائه گردیده است. تبدیل ویولت دسته‌ای از توابع ریاضی است که برای تجزیه سیگنال به مؤلفه‌های فرکانسی و فضایی (زمانی یا مکانی) آن بکار می‌رود. از جمله کاربردهای این تبدیل، شناسایی عیوب سازه‌های بر اساس تحلیل داده‌های پاسخ ارتعاشی سازه می‌باشد. به‌طور کلی تبدیل ویولت به دو دسته پیوسته و گسسته تقسیم بندی می‌شود. در کار حاضر با توجه به کارایی بهتر تبدیل ویولت گسسته نسبت به پیوسته در عیب‌یابی [۱۵]، از این تبدیل در محاسبات استفاده شده است.

۲-۱- تبدیل ویولت گسسته

توابع ویولت مادر از رابطه (۱) به‌دست می‌آیند [۱۷].

$$\begin{aligned}\phi(t) &= \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h_0(k) \phi(2t-k) \\ \psi(t) &= \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h_1(k) \phi(2t-k)\end{aligned}\quad (1)$$

که در آن $\phi(t)$ تابع مقیاس، $\psi(t)$ تابع ویولت و h_0 و h_1 به ترتیب فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر می‌باشند.

بسط تابع $f(t)$ برحسب توابع $\phi(t)$ و $\psi(t)$ به‌صورت رابطه (۲) می‌باشد.

$$\begin{aligned}f(t) &= \sum_k c_j(k) 2^{\frac{j}{2}} \phi(2^j t - k) \\ &+ \sum_k d_j(k) 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j t - k)\end{aligned}\quad (2)$$

لذا در صورت عدم حذف نویز، کارایی روش عیب‌یابی کاهش یافته و بعضاً مختل می‌شود. لذا در این مقاله استفاده از روش هیبریدی عیب‌یابی توسط تبدیل ویولت و بروزرسانی مدل المان محدود با وجود نویز در داده‌های اندازه‌گیری پیشنهاد شده است. بدین صورت که ناحیه اولیه عملکرد روش بروزرسانی برای شناسایی پارامترهای کمی عیب توسط تبدیل ویولت مشخص می‌شود. کاربردهای تبدیل ویولت برای تشخیص خرابی توسط محققان بسیاری توسعه پیدا کرده است [۱]. تبدیل ویولت نه تنها برای سیگنال‌های زمانی بلکه برای سیگنال‌های فضایی^۱ استفاده می‌شود. موقع استفاده از تبدیل ویولت مبتنی بر سیگنال فضایی، تغییر شکل استاتیکی یا شکل مودهای سازه می‌تواند استفاده شود [۱، ۲].

به‌طور کلی تبدیل ویولت به دو دسته اصلی تبدیل ویولت پیوسته و گسسته تقسیم می‌شوند. تبدیل ویولت پیوسته^۲ (CWT) نسبت به گسسته^۳ (DWT) از رزولوشن بالاتری برخوردار است اما از نظر حجم محاسباتی استفاده از تبدیل گسسته توصیه می‌شود [۳]. جرجسون^۴ و همکاران واژه‌نامه‌ای از اصطلاحات و تعاریف متداول در تبدیل ویولت را فراهم آورده است و به سپس به تعریف ویولت پیوسته و گسسته پرداخته است [۴].

نتایج مطالعات انجام شده توسط محققان در چند سال اخیر نشان می‌دهد که کاربرد تبدیل ویولت گسسته هم برای مسائل یک بعدی و هم برای مسائل دو بعدی مناسب‌تر است زیرا در مقایسه با CWT و تبدیلات مربوط دیگر که در حوزه عیب‌یابی سازه استفاده می‌شود، حساسیت بالاتر و مزیت‌های محاسباتی بیشتری دارد [۵]. با استفاده از اعمال تبدیل ویولت به بردارهای شکل‌مود یا مشتق آن‌ها می‌توان به شناسایی عیب در سازه پرداخت [۶]. با این حال محققان بسیاری نشان دادند که جابجایی شکل‌مودها برای عیب‌های کوچک هم در تیرها و هم در صفحات، حتی با وجود تعداد نقاط اندازه‌گیری بسیار زیاد، خیلی حساس نیست. برای بهبود حساسیت داده‌های شکل‌مودهای مربوط به عیب، استفاده از مشتقات شکل‌مودها برای تشخیص خرابی پیشنهاد شده است [۷]. بختیاری نژاد و موسوی [۸] کاربرد تبدیل ویولت را برای تشخیص عیب در یک تیر اوپلر برنولی با چندین ترک بررسی نموده‌اند. همچنین به منظور تشخیص خرابی، روش را برای پوسته‌های استوانه‌ای دوار تعمیم داده و از شکل‌مودهای تیر اوپلر برنولی برای تعریف میدان جابجایی پوسته بهره برده‌اند. ایشان در کارشان از تبدیل ویولت پیوسته استفاده کردند و بدون بیان دلایل محکم از ویولت پایه گاوس^۵ در مقیاس ۸ استفاده نمود. کاوتین^۶ بمنظور تشخیص خرابی در صفحات کامپوزیتی، استفاده از تبدیل ویولت بی‌اسپی‌لین^۷ را پیشنهاد داد. وی از سه شکل‌مود اول داده‌های تجربی استفاده نمود. علاوه بر این، اثبات شده است که ویولت‌های بی‌اسپی‌لین، در مقایسه با دیگر ویولت‌های تکیه‌گاه فشرده نتایج بهتری را فراهم می‌آورد. این موضوع هم در یک بعدی و هم در دو بعدی صادق است [۹].

محققان بسیاری بمنظور افزایش کارایی و قابلیت شناسایی عیب توسط پردازش سیگنال‌های ارتعاشی، از ترکیب چند روش به‌طور همزمان استفاده نموده‌اند. به‌عنوان مثال کیم و بارتکوویچ^۸ یک روش دو مرحله‌ای برای شناسایی عیب در سازه‌های بزرگ را ارائه دادند. در روش اول با استفاده از

9. Optimal matrix method
10. Hybrid model reduction/eigenvector expansion technique
11. Sensitivity based method
12. Perera and Ruiz
13. Cavalini
14. Rodriguez
15. Lee
16. Joseph Fourier
17. Alfred Haar
18. Jean Morlet

1. Spatial
2. Continous Wavelet Transform
3. Discrete Wavelet Transform
4. Jorgenson
5. Gauss4
6. Katunin
7. B-Spline
8. Kim and Bartkowicz

اگر شکل‌مود سازه در حالت معیوب با ψ_r^* نشان داده شود، به‌طور مشابه می‌توان U_r^* برای تمام شکل‌مودها و $U_{r,mn}^*$ را برای تمام المان‌های سازه محاسبه نمود. همچنین نسبت انرژی المان mn به انرژی کل برای دو حالت سالم و معیوب از روابط (۶) به‌دست می‌آید [۲۲].

$$F_{l,mn} = \frac{U_{l,mn}}{U_l} \quad (۶)$$

$$F_{l,mn}^* = \frac{U_{l,mn}^*}{U_l^*}$$

به‌طوری‌که علامت * نشانگر حالت معیوب می‌باشد. نسبت این دو پارامتر حاوی اطلاعات مناسبی از محل عیب می‌باشد.

۳- بروزرسانی مدل المان محدود

دسته دیگری از روش‌های عیب‌یابی موجود است که از آن‌ها به‌عنوان روش‌های بروزرسانی مدل^۳ یاد می‌شود. در روش‌های موجود در این دسته هدف این است که با تعریف عیب در مدل المان محدود، مکان و دیگر ویژگی‌های عیب را به‌گونه‌ای تعیین کنند که پارامترهای مودال حاصل از حل عددی مدل المان محدود نسبت به پارامترهای مودال حاصل از آزمون بر روی سازه معیوب کمترین اختلاف را داشته باشد. در روش‌های موجود در این دسته هدف این است که با تعریف عیب در مدل المان محدود، مکان و دیگر ویژگی‌های عیب را به‌گونه‌ای تنظیم کنند که پارامترهای مودال حاصل از حل عددی مدل المان محدود نسبت به پارامترهای مودال حاصل از آزمون بر روی سازه معیوب کمترین اختلاف را داشته باشد. تکنیک‌های توسعه یافته برای بروزرسانی مدل المان محدود به دو دسته روش‌های مستقیم^۴ و روش‌های تکرار شونده^۵ تقسیم می‌شوند. در روش‌های مستقیم، مدل المان محدود بدون هیچ‌گونه توجه به تغییر در پارامترهای فیزیکی بروز می‌شود. به همین علت روش‌های مستقیم منجر به ایجاد مدل‌هایی می‌شوند که با وجود اینکه بیان‌کننده خروجی مناسب می‌باشند، هیچ‌گونه توجهی به مدل سازه تحت آزمایش ندارند. این نقص در روش، باعث به‌وجود آمدن ماتریس‌های جرم و سختی می‌شوند که معنای فیزیکی ناچیزی داشته و نمی‌توان آن‌ها را به مدل المان محدود اصلی سازه مربوط ساخت. علاوه بر این اتصال^۶ در گره‌ها در مدل المان محدود قابل تضمین نیست. در روش‌های تکرار شونده پارامترهای فیزیکی تا جایی بروز می‌شوند که خروجی مدل المان محدود بروز شده با داده‌های حاصل از تست به دقت خاصی از تطابق برسند. بدلیل این ویژگی روش‌های تکرار شونده، مدل‌های المان محدود تولید شده دارای شرط اتصال در گره‌ها بوده و همچنین ماتریس‌های جرم و سختی تولید شده دارای معنای فیزیکی کامل نسبت به سازه تحت بررسی می‌باشند [۲۳].

با توجه به مطالب عنوان شده، برای شناسایی دقیق‌تر عیب در سازه نیازمند روش‌های بروزرسانی مدل می‌باشیم و همچنین بعلمت عدم داشتن معنای فیزیکی مدل در روش‌های مستقیم، این روش‌ها برای عیب‌یابی در مدل مناسب نمی‌باشند. وجود مسایل پیچیده علمی منجر می‌شود تا سراغ روش‌های بهینه‌سازی رفته و مساله مورد نظر را به وسیله آن‌ها حل کرد. با توجه به زمان‌بر بودن و پیچیدگی روش‌های دقیق از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند استفاده می‌شود. تاکنون روش‌های بهینه‌سازی متعددی معرفی شده‌اند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به الگوریتم‌های تکاملی^۷، الگوریتم

که در آن d_j و c_j به ترتیب ضریب مقیاس (مقادیر سیگنال بعد از اعمال فیلتر بالاگذر) و ضریب موجک (مقادیر سیگنال بعد از اعمال فیلتر پایین‌گذر) در مقیاس j می‌باشند. منظور از تبدیل ویولت یک سیگنال در واقع استخراج مقادیر ضرایب ویولت (d_j) آن سیگنال می‌باشد.

۲-۲- سیگنال انرژی کرنشی

سیگنال مورد استفاده در عیب‌یابی توسط تبدیل ویولت ($f(t)$) از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. هرچه سیگنال نسبت به وجود عیب حساس‌تر باشد تبدیل ویولت راحت‌تر قادر به شناسایی ناهمگونی ایجاد شده در اثر عیب خواهد بود. در بین روش‌های کلاسیک عیب‌یابی ارتعاشی مبتنی بر خواص مودال، روش اختلاف انرژی کرنشی نسبت به وجود عیب بیشترین حساسیت را دارد. به عبارت دیگر این سیگنال حاوی بیشترین اطلاعات در خصوص عیب می‌باشد [۱۸-۲۰]. لذا با توجه به این مطلب در این مقاله سیگنال انرژی کرنشی در دو حالت سالم و معیوب به‌عنوان داده اصلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بخش شیوه استخراج انرژی کرنشی یک صفحه کامپوزیتی مبتنی بر شکل‌مود توضیح داده می‌شود. انرژی کرنشی نوعی انرژی پتانسیل است که در اثر تغییر شکل الاستیک سازه ذخیره می‌شود. در صورت وجود اختلاف در خواص فیزیکی دو نمونه نظیر اختلاف ماتریس سختی^۱ آن‌ها، سیگنال انرژی کرنشی این دو نمونه معیار مناسبی برای بررسی این اختلاف می‌باشد. برای هر مود ارتعاشی انرژی کرنشی به‌صورت رابطه (۳) در نظر گرفته می‌شود.

$$E_{ra} = \frac{1}{2} \phi_r^T K \phi_r \quad (۳)$$

اگر یک شکل‌مود خاص نظیر ψ_r در یک صفحه مرکب با تعداد لایه N در نظر گرفته شود، می‌توان انرژی کرنشی صفحه را به صورت رابطه (۴) و (۵) نوشت [۲۱].

$$U_r = \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a \{ D_{11} \left(\frac{\partial^2 \psi_r}{\partial x^2} \right)^2 + 2D_{12} \frac{\partial^2 \psi_r}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \psi_r}{\partial y^2} + D_{22} \left(\frac{\partial^2 \psi_r}{\partial y^2} \right)^2 + 4D_{16} \frac{\partial^2 \psi_r}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \psi_r}{\partial x \partial y} + 4D_{26} \frac{\partial^2 \psi_r}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \psi_r}{\partial x \partial y} + 4D_{66} \left(\frac{\partial^2 \psi_r}{\partial x \partial y} \right)^2 \} dx dy \quad (۴)$$

برای حالتی که مدل صفحه توسط روش المان محدود گسسته‌سازی شود رابطه انرژی برای هر المان به‌صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود.

$$U_{r,mn} = \frac{1}{2} \int_{b_{n-1}}^{b_n} \int_{a_{m-1}}^{a_m} \{ D_{11} \left(\frac{\partial^2 \psi_r}{\partial x^2} \right)^2 + 2D_{12} \frac{\partial^2 \psi_r}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \psi_r}{\partial y^2} + D_{22} \left(\frac{\partial^2 \psi_r}{\partial y^2} \right)^2 + 4D_{16} \frac{\partial^2 \psi_r}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \psi_r}{\partial x \partial y} + 4D_{26} \frac{\partial^2 \psi_r}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \psi_r}{\partial x \partial y} + 4D_{66} \left(\frac{\partial^2 \psi_r}{\partial x \partial y} \right)^2 \} dx dy \quad (۵)$$

که در این معادله، D_{ij} ضرایب ماتریس سختی خمشی^۲ ماده مرکب، a طول صفحه و b عرض صفحه می‌باشند، همچنین a_m, a_{m-1}, b_n و b_{n-1} مختصات چهار گوشه mn امین المان به ترتیب در مختصات x و y است.

1. stiffness
2. Bending stiffness matrix coefficients

3. Model updating
4. Direct
5. Iterative
6. Connectivity
7. evolutionary algorithms

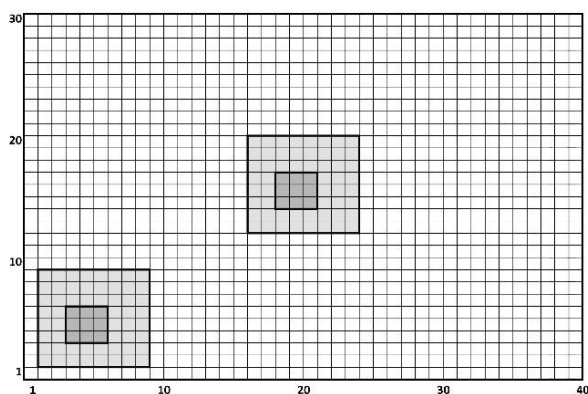
و سپس از طریق نودهای مشترک این صفحه با هم کوپل^۷ می‌شوند. بمنظور جلوگیری از توهّم رفتگی المان‌ها، بین نودها از المان تماسی^۸ استفاده می‌شود. برای ایجاد ناحیه تورق کافیسیت تا نودهای این ناحیه دی کوپل^۹ شوند. در جدول ۱ می‌توان مشخصات کلی صفحات کامپوزیتی مورد مطالعه را مشاهده نمود.

پارامتر	مقدار
a	0.4m
b	0.3m
تعداد لایه‌ها	8
چیدمان لایه‌ها	(0,90,90,0) _s
چگالی	$\rho = 1900 \text{ kg / m}^3$
ضخامت هر لایه	0.2mm
ضرایب پواسون	$\nu_{xy} = 0.254, \nu_{yz} = 0.428, \nu_{xz} = 0.254$
مدول یانگ خمشی	$E_x = 50, E_y = 15.2, E_z = 15.2 \text{ GPa}$
مدول یانگ برشی	$G_{xy} = 4.7, G_{yz} = 3.28, G_{xz} = 4.7 \text{ GPa}$

برای بررسی حساسیت روش ارائه شده در عیب‌یابی نمونه‌های معیوب متفاوت در حضور نوبز از نظر موقعیت و شدت، طبق جدول ۲، ۸ سناریوی مختلف عیب در نظر گرفته می‌شود.

شماره سناریو	محل عیب	شماره لایه	شدت عیب (درصد)
۱	گوشه	۴	۰/۷۵
۲	گوشه	۱	۰/۷۵
۳	وسط	۴	۰/۷۵
۴	وسط	۱	۰/۷۵
۵	گوشه	۴	۵/۳۴
۶	گوشه	۱	۵/۳۴
۷	وسط	۴	۵/۳۴
۸	وسط	۱	۵/۳۴

شماتیک مدل عددی این صفحات به‌طور کلی مطابق شکل ۱ است.



شکل ۱ شماتیک مدل عددی صفحات کامپوزیتی معیوب

7. Couple
8. Contact
9. Decouple

شبهه‌ساز سردکردن فلزات^۱، الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات^۲، الگوریتم بهینه‌سازی مورچه‌ها^۳ و غیره اشاره نمود [۲۴]. در ادامه، معرفی اجمالی از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان شناخته‌شده‌ترین الگوریتم مبتنی بر هوش محاسباتی آورده شده است.

۴- الگوریتم ژنتیک

۴-۱- مقدمه

الگوریتم ژنتیک یکی از زیرمجموعه‌های هوش مصنوعی^۴ می‌باشد. الگوریتم ژنتیک را می‌توان یک روش جستجوی کلی نامید که از قوانین تکامل بیولوژیک طبیعی تقلید می‌کند. الگوریتم ژنتیک بر روی یک سری از جواب‌های مساله به امید به‌دست آوردن جواب‌های بهتر قانون بقای بهترین را اعمال می‌کند. در هر نسل به کمک فرآیند انتخابی متناسب با ارزش جواب‌ها و تولید مثل جواب‌های انتخاب شده به کمک عملگرهایی که از ژنتیک طبیعی تقلید شده‌اند، تقریب‌های بهتری از جواب نهایی به‌دست می‌آید. این فرآیند باعث می‌شود که نسل‌های جدید با شرایط مساله سازگارتر باشد [۲۵].

۴-۲- روند کلی الگوریتم‌های ژنتیکی

قبل از این که یک الگوریتم ژنتیکی بتواند اجرا شود، ابتدا باید کدگذاری (یا نمایش) مناسبی برای مسئله مورد نظر پیدا شود. معمولی‌ترین شیوه نمایش کروموزوم‌ها در الگوریتم ژنتیک به شکل رشته‌های دودویی است. هر متغیر تصمیم‌گیری به‌صورت دودویی در آمده و سپس با کنار هم قرارگرفتن این متغیرها کروموزوم ایجاد می‌شود. همچنین یک تابع برازندگی نیز باید ابداع شود تا به هر راه حل کدگذاری شده ارزشی را نسبت دهد. در طی اجرا، والدین برای تولید مثل انتخاب می‌شوند و با استفاده از عملگرهای آمیزش و جهش با هم ترکیب می‌شوند تا فرزندان جدیدی تولید کنند. این فرآیند چندین بار تکرار می‌شود تا نسل بعدی جمعیت تولید شود. سپس این جمعیت بررسی می‌شود و در صورتی که ضوابط همگرایی برآورده شوند، فرآیند فوق خاتمه می‌یابد. از آنجایی که الگوریتم‌های ژنتیک بر پایه تولید و تست می‌باشند، جواب مساله مشخص نیست و معلوم نیست که کدام یک از جواب‌های تولید شده جواب بهینه است. لذا برای شرط خاتمه معیارهای زیر در نظر گرفته می‌شود:

تعداد مشخصی نسل: می‌توانیم شرط خاتمه را مثلاً ۱۰۰ دور چرخش حلقه اصلی برنامه قرار دهیم.

کوچکتر شدن تابع خطا از مقدار مشخص شده.

عدم بهبود در بهترین شایستگی جمعیت در طی چند نسل متوالی.

شرایط دیگری نیز می‌توان تعریف کرد و همچنین می‌توان ترکیبی از

موارد فوق را به‌عنوان شرط خاتمه به کار بست [۲۶].

۵- صحنه‌گذاری

۵-۱- مدلسازی صفحه کامپوزیتی

به‌منظور بررسی روش پیشنهادی، از شبهه‌ساز عددی صفحه کامپوزیتی در نرم‌افزار آنسیس^۵ استفاده می‌شود. بدین منظور از المان چند لایه سالید ۱۸۶^۶ برای شبهه‌ساز صفحه کامپوزیتی استفاده شده است. برای شبهه‌ساز عیب تورق بین لایه m و n ابتدا دو صفحه مجزا m لایه و n لایه ساخته شده

1. Simulated annealing
2. Particle swarm optimization
3. Ant colony
4. Artificial intelligence
5. ANSYS
6. SOLID186

۵-۲- عیب یابی

گام اول در استفاده از روش هیبریدی استفاده از تبدیل ویولت برای شناسایی محدوده اولیه عیب برای استفاده در فرآیند روزرسانی می باشد. سپس عملیات بهینه سازی توسط الگوریتم ژنتیک در این ناحیه محدود شده انجام می پذیرد. شناسایی ناحیه اولیه به صورت کیفی و از روی نمودار سه بعدی تبدیل ویولت می باشد. ناحیه ای که دامنه ویولت نسبت به سایر نواحی بیشترین اختلاف را داشته باشد به عنوان محدوده عیب انتخاب خواهد شد. ویولت مورد استفاده در این مقاله از نوع تبدیل دو بعدی بی اسپسی لاین می باشد [۹]. این ویولت بر روی سیگنال نسبت انرژی کرنشی در دو حالت سالم و معیوب پیاده سازی می شود. به رابطه (۷) توجه شود.

$$\beta_{r,mn} = \left(\frac{F_{r,mn}^*}{F_{r,mn}} \right) \quad (7)$$

در داده های مودال معمولاً نویز به سطح داده های پاسخ فرکانسی اضافه شده و تأثیری در جابجایی پیک های آن ندارد. لذا در این جا تنها اثر نویز بر شکل مود بررسی می شود. برای شبیه سازی نویز از رابطه (۸) استفاده می شود.

$$\hat{\phi}_k = \phi_k + \lambda \times randn(\phi_k) \quad (8)$$

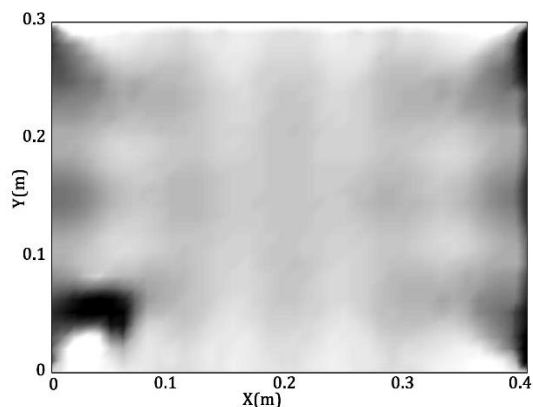
به طوری که ϕ_k شکل مود k ام، $\hat{\phi}_k$ شکل مود k ام نویزی و λ سطح نویز می باشد. تابع اتفاقی^۱ نیز تابع تولید مقادیر رندم طبق توزیع گاوسی است. قابل ذکر است ایجاد نویز تنها برای شبیه سازی حالت تست بوده و برای تمامی شکل مودها مقدار ثابتی در نظر گرفته می شود.

به منظور انجام مقایسه بین دو روش، تابع هدف در این فعالیت برای هر دو حالت کلاسیک (استفاده از تمامی فضای مسئله) و روش هیبریدی (فضای محدود شده توسط ویولت) یکسان بوده و طبق رابطه (۹) محاسبه می شود.

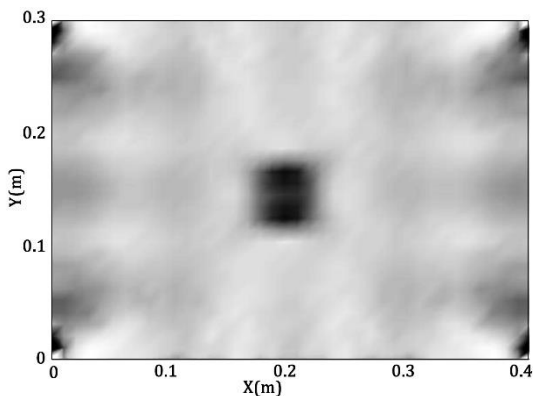
$$\beta_r = norm \left(\frac{U_{r,mn}^e - U_{r,mn}^n}{U_{r,mn}^e} \right) \quad (9)$$

$$error = \sum_{r=1}^N \beta_r^2$$

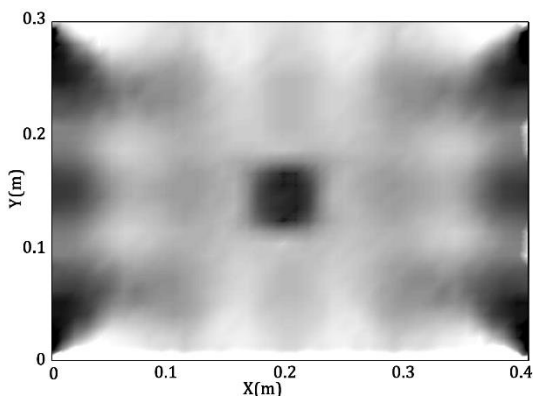
که در آن U^n انرژی هر المان حاصل از حل الگوریتم ژنتیک و U^e انرژی هر المان در حالت تست همراه با نویز می باشد (رابطه (۵)). نمودارهای تبدیل ویولت طبق رابطه (۲) برای ۸ سناریوی مورد مطالعه در حالت بدون نویز طبق شکل های ۲ تا ۹ می باشد.



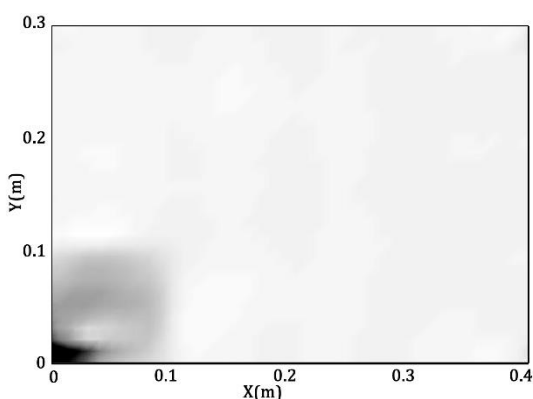
شکل ۲ نمودار تبدیل ویولت صفحه کامپوزیتی سناریوی ۲



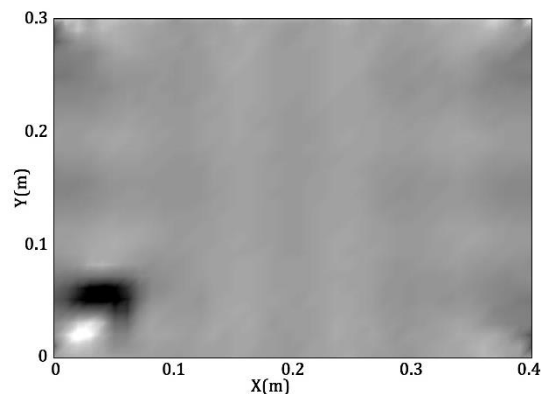
شکل ۳ نمودار تبدیل ویولت صفحه کامپوزیتی سناریوی ۳



شکل ۴ نمودار تبدیل ویولت صفحه کامپوزیتی سناریوی ۴



شکل ۵ نمودار تبدیل ویولت صفحه کامپوزیتی سناریوی ۵

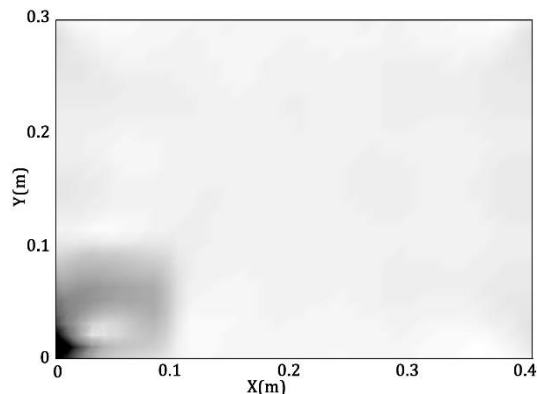


شکل ۶ نمودار تبدیل ویولت صفحه کامپوزیتی سناریوی ۶

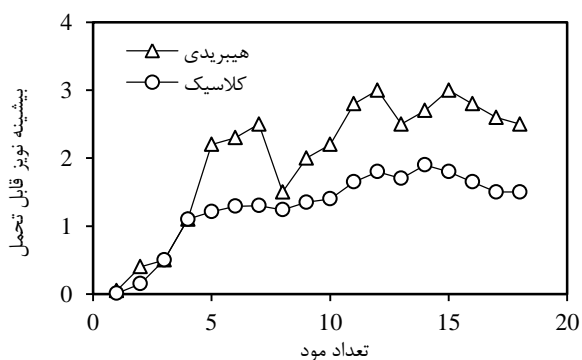
1. Rand

جدول ۳ شناسایی موقعیت اولیه عیب توسط تبدیل ویولت

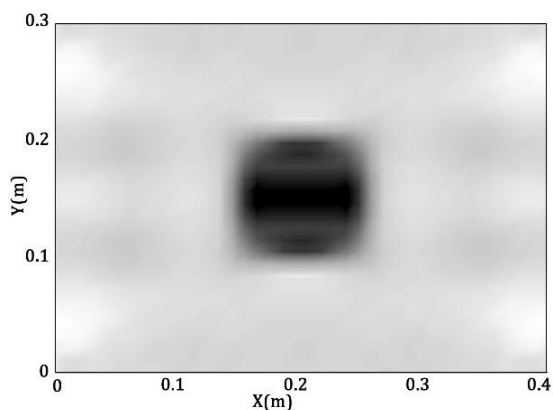
شماره سناریو	محل دقیق عیب cm (x1, x2, y1, y2)	محل شناسایی شده اولیه عیب cm (x1, x2, y1, y2)
۱	(۳.۶, ۳.۶)	(۰, ۱۰, ۰, ۱۰)
۲	(۳.۶, ۳.۶)	(۰, ۱۰, ۰, ۱۰)
۳	(۱۸.۲۱, ۱۴.۱۷)	(۱۵.۲۵, ۸.۲۲)
۴	(۱۸.۲۱, ۱۴.۱۷)	(۱۳.۲۷, ۱۰.۲۰)
۵	(۱.۹, ۱.۹)	(۰, ۱۲, ۰, ۱۲)
۶	(۱.۹, ۱.۹)	(۰, ۱۲, ۰, ۱۲)
۷	(۱۶.۲۴, ۱۲.۲۰)	(۱۰.۳۰, ۵.۲۵)
۸	(۱۶.۲۴, ۱۲.۲۰)	(۱۰.۳۰, ۵.۲۵)



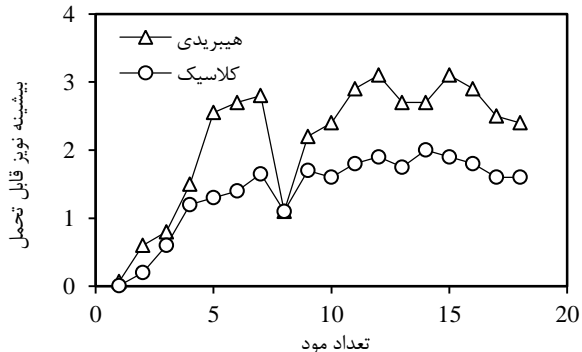
شکل ۶ نمودار تبدیل ویولت صفحه کامپوزیتی سناریوی ۶



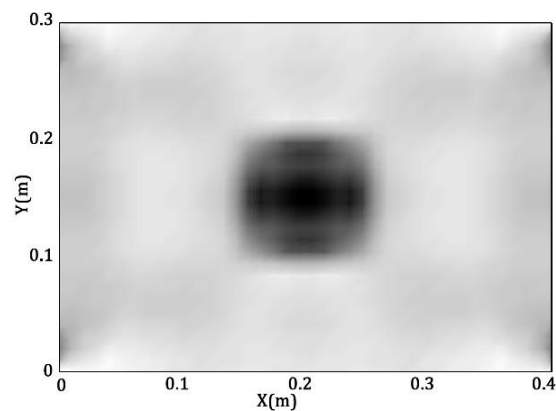
شکل ۱۰ پایداری به نویز برحسب تعداد شکل مود در دو روش کلاسیک و هیبریدی عیب‌یابی توسط بروزرسانی مدل المان محدود برای سناریوی ۱



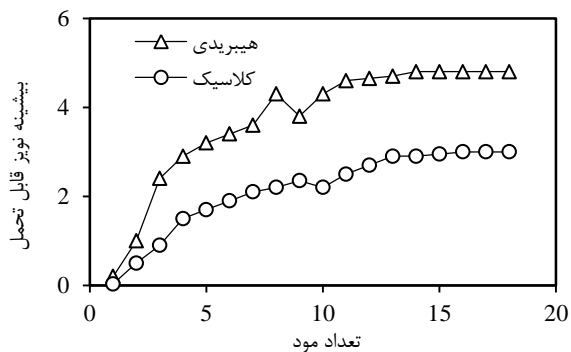
شکل ۸ نمودار تبدیل ویولت صفحه کامپوزیتی سناریوی ۷



شکل ۱۱ پایداری به نویز برحسب تعداد شکل مود در دو روش کلاسیک و هیبریدی عیب‌یابی توسط بروزرسانی مدل المان محدود برای سناریوی ۲



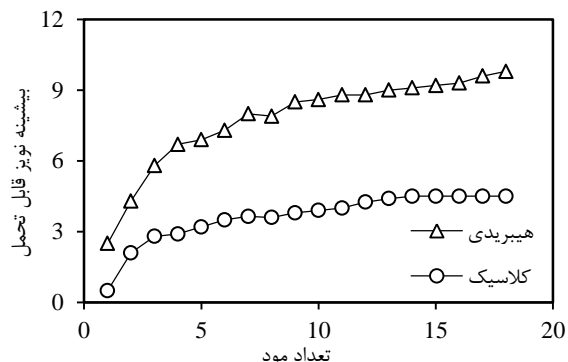
شکل ۹ نمودار تبدیل ویولت صفحه کامپوزیتی سناریوی ۸



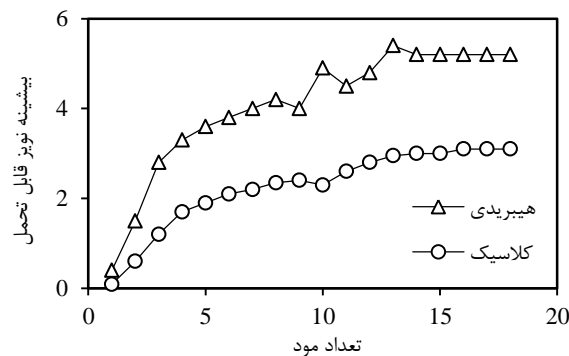
شکل ۱۲ پایداری به نویز برحسب تعداد شکل مود در دو روش کلاسیک و هیبریدی عیب‌یابی توسط بروزرسانی مدل المان محدود برای سناریوی ۳

طبق نمودارهای فوق محل شناسایی شده عیب به‌طور اولیه برای این نمونه‌ها مطابق با جدول ۳ خواهد بود.

مشابه این فرآیند برای تمامی حالات در حضور نویز نیز انجام شده و محل اولیه عیب برای پیاده‌سازی در فرآیند بروزرسانی مدل المان محدود تعیین خواهد شد. تابع خطا در فرآیند بروزرسانی اختلاف انرژی کرنشی وزندهی شده در دو حالت حل ژنتیک الگوریتم و حل مرجع می‌باشد. حداقل ۵ بار حل ژنتیک الگوریتم برای هر سناریو انجام پذیرفته است. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۷ منحنی‌های پایداری به نویز (بیشینه نویزی که بتوان در روش بروزرسانی، عیب را به درستی شناسایی نمود) برحسب تعداد شکل مود استفاده شده در محاسبات مربوطه در فرآیند عیب‌یابی برای دو روش کلاسیک و هیبریدی بروزرسانی مدل المان محدود قابل مشاهده می‌باشد.



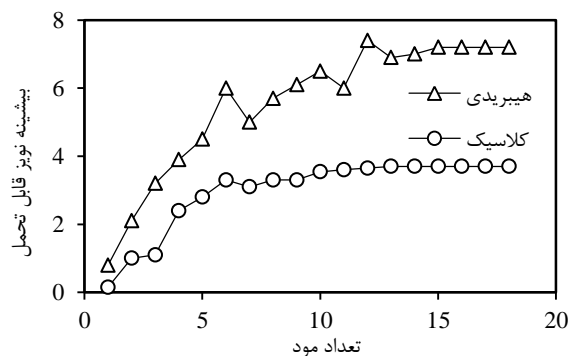
شکل ۱۷ پایداری به نويز برحسب تعداد شکل مود در دو روش کلاسیک و هیبریدی عیب‌یابی توسط بروزسانی مدل المان محدود برای سناریوی ۸



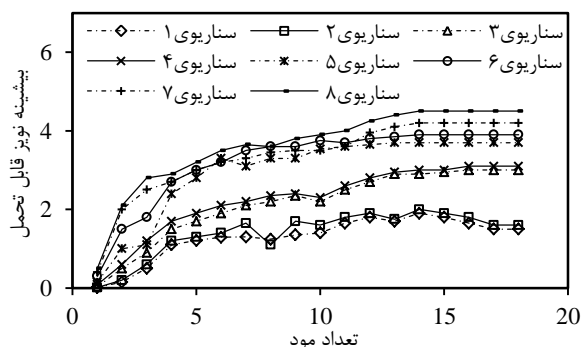
شکل ۱۳ پایداری به نويز برحسب تعداد شکل مود در دو روش کلاسیک و هیبریدی عیب‌یابی توسط بروزسانی مدل المان محدود برای سناریوی ۴

طبق این نمودارها همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از روش هیبریدی منجر به افزایش چشم‌گیری در پایداری نسبت به نويز فرآیند عیب‌یابی می‌شود.

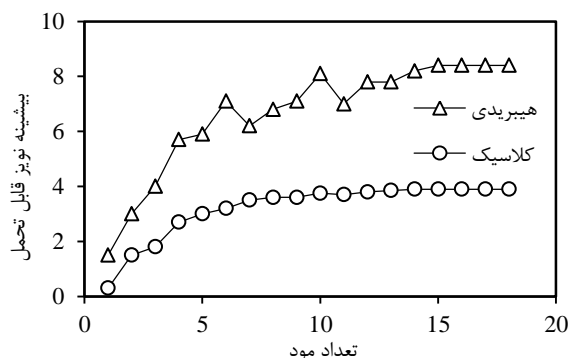
همچنین با بررسی رفتار تغییرات نويز قابل تحمل برحسب شکل مود طبق شکل‌های ۱۸ و ۱۹ مشاهده می‌شود که به‌طور کلی با افزایش تعداد شکل مود مورد استفاده در فرآیند بروزسانی در دو روش کلاسیک و هیبریدی، عیب‌یابی با نويز بیشتری امکانپذیر می‌باشد که البته این قاعده در برخی از شکل مودها مستثنی است که علت آن می‌تواند تأثیر بیشتر نويز در آن شکل مود نسبت به اثر مثبت استفاده از آن در محاسبات مربوط به عیب‌یابی باشد.



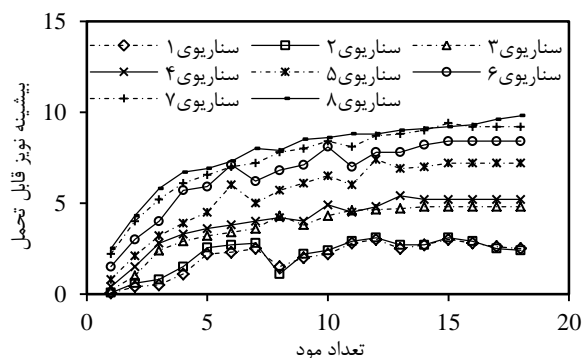
شکل ۱۴ پایداری به نويز برحسب تعداد شکل مود در دو روش کلاسیک و هیبریدی عیب‌یابی توسط بروزسانی مدل المان محدود برای سناریوی ۵



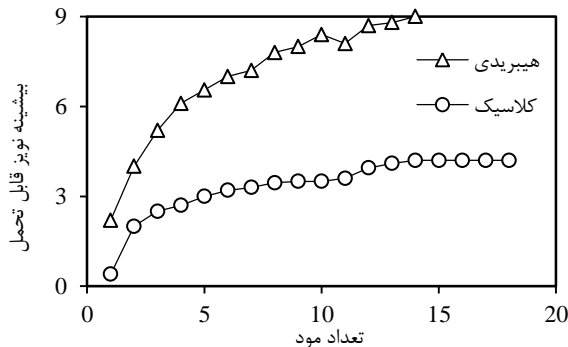
شکل ۱۸ پایداری به نويز برحسب تعداد شکل مود در روش کلاسیک عیب‌یابی توسط بروزسانی مدل المان محدود



شکل ۱۵ پایداری به نويز برحسب تعداد شکل مود در دو روش کلاسیک و هیبریدی عیب‌یابی توسط بروزسانی مدل المان محدود برای سناریوی ۶



شکل ۱۹ پایداری به نويز برحسب تعداد شکل مود در روش هیبریدی عیب‌یابی توسط بروزسانی مدل المان محدود



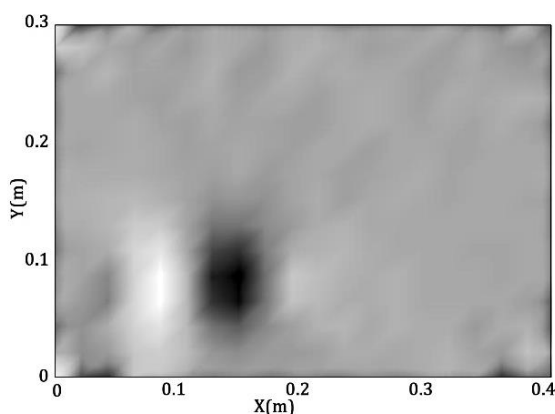
شکل ۱۶ پایداری به نويز برحسب تعداد شکل مود در دو روش کلاسیک و هیبریدی عیب‌یابی توسط بروزسانی مدل المان محدود برای سناریوی ۷

همچنین از یک سنسور شتاب‌سنج پیزوالکتریک برای ثبت داده‌های شتاب استفاده شده است. تعداد نقاط اندازه‌گیری در این تست 11×11 (در مجموع ۱۲۱ نقطه) بوده است. همچنین ۶ مود اول الاستیک اندازه‌گیری شده است (جدول ۴).

جدول ۴ فرکانس‌های طبیعی صفحات سالم و معیوب تجربی بر حسب مرتبه

شماره مود	صفحه سالم	صفحه معیوب
۱	۲۲/۳۴	۲۲/۳۴
۲	۴۲/۶۳	۴۲/۵۸
۳	۶۲/۳۱	۶۲/۲۶
۴	۷۶/۲۹	۷۶/۱۲
۵	۸۸/۱	۸۷/۹۸
۶	۱۱۸/۳۵	۱۱۸/۲۷

پس از استخراج خواص مودال نمونه‌ها، نسبت انرژی کرنشی طبق رابطه (۷) استخراج شده و با پیاده‌سازی تبدیل ویولت دوبعدی بی‌اسپی‌لین می‌توان مکان اولیه عیب را شناسایی نمود (شکل ۲۲).



شکل ۲۲ شناسایی محل اولیه عیب توسط تبدیل ویولت

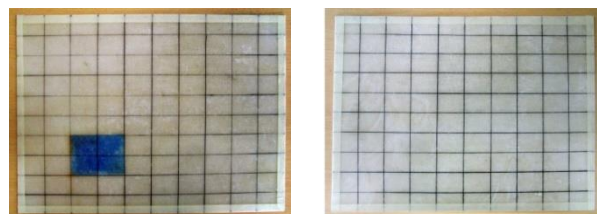
بعد از مشخص شدن ناحیه اولیه عیب و با تشکیل تابع خطا طبق رابطه (۹)، می‌توان با استفاده از فرایند بروزرسانی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، پارامترهای کمی عیب را استخراج نمود، بدین صورت که پارامترهای مرتبط با عیب شامل مختصات و شماره لایه عیب در مدل عددی طی فرایند بروزرسانی توری تغییر می‌کند که تابع خطای مربوطه کمینه شود. در شکل ۲۳ می‌توان شماتیک مکان شناسایی شده عیب توسط دو روش کلاسیک و هیبریدی بروزرسانی را مشاهده نمود. به طوری که ناحیه D مکان عیب در نمونه ساخته شده، ناحیه P مکان اولیه شناسایی شده توسط تبدیل ویولت، ناحیه C مکان شناسایی شده توسط فرایند بروزرسانی کلاسیک و ناحیه H مربوط به مکان شناسایی شده توسط روش هیبریدی پیشنهادی می‌باشد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، ناحیه عیب در روش پیشنهادی بطور دقیق شناسایی می‌شود، در حالیکه روش کلاسیک مکان عیب را به اشتباه تشخیص داده است. علت عدم موفقیت عیب‌یابی توسط فرایند بروزرسانی کلاسیک، غلبه تأثیر عدم قطعیت ناشی از نوبز اندازه‌گیری به اثر ناشی عیب تورق در تابع خطا می‌باشد. به تعبیر دیگر پدیده نوبز باعث پیشنهاد مکان غیرواقعی به عنوان پاسخ عیب‌یابی می‌شود که در روش هیبریدی با حذف این مکان‌ها، پایداری به نوبز در روش بروزرسانی افزایش می‌یابد.

لذا استفاده از شکل موده‌های منتخب در عیب‌یابی که بیشترین تأثیر را دارند می‌تواند کمک شایانی به فرآیند عیب‌یابی کند. با توجه به عدم پیروی رفتار این نمودارها از قانون مشخصی، استفاده از تمامی ترکیب‌های ممکن از شکل مودها در عیب‌یابی و جمع‌بندی کلی از شناسایی پارامترهای عیب مناسب به نظر می‌رسد.

۵-۳- نمونه تجربی

برای کاهش عدم قطعیت‌های موجود به دلیل وجود عدم تکرارپذیری در ساخت صفحات کامپوزیتی، نمونه سالم و معیوب، از برش یک صفحه کامپوزیتی واحد به ابعاد $60\text{cm} \times 40\text{cm}$ و تقسیم آن به دو نمونه $30\text{cm} \times 40\text{cm}$ بدست آمده است.

به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، از نتایج تست مودال یک سری صفحات کامپوزیتی سالم و معیوب با مشخصات کلی طبق جدول ۱ استفاده شده است. برای ساخت نمونه معیوب ۸ لایه با عیب تورق بین لایه ۳ و ۴، از یک لایه پلاستیکی دوجداره بین این دو لایه در ناحیه عیب در حین مونتاژ صفحه استفاده شده است. عیب تورق با ابعاد $60\text{mm} \times 80\text{mm}$ (شدت ۴٪) در موقعیت $x_0 = 120\text{mm}, y_0 = 90\text{mm}$ می‌باشد (شکل ۲۰).



الف) نمونه سالم ب) نمونه معیوب

شکل ۲۰ نمونه‌های تجربی ساخته شده

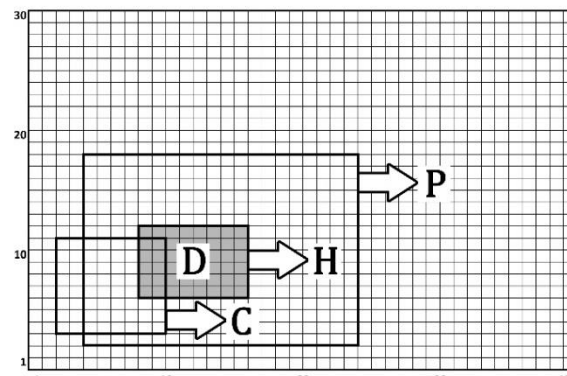
تست مودال در شرایط مرزی آزاد و با استفاده از محرک چکش انجام شده است (شکل ۲۱).



شکل ۲۱ تست مودال توسط چکش

۷- مراجع

- [1] Taha, M.R. Noureldin, A. Lucero, J. and Baca, T., "Wavelet Transform For Structural Health Monitoring: A Compendium Of Uses And Features", Structural Health Monitoring, Vol. 5, No. 3, pp. 267-295, 2006.
- [2] Kim, H. and Melhem, H., "Damage Detection Of Structures By Wavelet Analysis", Engineering Structures, Vol. 26, No. 3, pp. 347-362, 2004.
- [3] Gao, R.X. and Yan, R., "Wavelets: Theory And Applications For Manufacturing", Springer Science & Business Media, New York, pp. 33-68, 2010.
- [4] Jorgensen, P.E. and Song, M.S., "Comparison of Discrete And Continuous Wavelet Transforms", Computational Complexity: Theory, Techniques, and Applications, pp. 513-526, 2012.
- [5] Katunin, A., "Spatial Damage Identification In Composite Plates Using Multiwavelets", Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics, Vol. 12, No. 3, 2013.
- [6] Rucka, M. and Wilde, K., "Application Of Continuous Wavelet Transform In Vibration Based Damage Detection Method For Beams And Plates", Journal Of Sound And Vibration, Vol. 297, No. 3, pp. 536-550, 2006.
- [7] Yoon, M. Heider, D. Gillespie, J. Ratcliffe, C. and Crane, R., "Local Damage Detection Using The Two-Dimensional Gapped Smoothing Method", Journal Of Sound And Vibration, Vol. 279, No. 1, pp. 119-139, 2005.
- [8] Bakhtiari-Nejad, F. and Bideleh, S.M.M., "Application of Continuous Wavelet Transform in Vibration-Based Damage Detection For Circular Cylindrical Shells", In Persian, 5th Condition Monitoring & Fault Diagnosis Conference: Petroleum University of Technology, Abadan, Iran, 2011.
- [9] Katunin, A., "Damage Identification in Composite Plates Using Two-Dimensional B-Spline Wavelets", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 25, No. 8, pp. 3153-3167, 2011.
- [10] Cavalini, A. Franco, V. Gonzalez, C. Lopes Jr, V. and De Melo, G., "Noise Influence On Damage Detection Through Modal State Observers Methodology", Trends in Applied and Computational Mathematics, Vol. 9, No. 2, pp. 195-204, 2008.
- [11] Rodriguez-Rocha, R. Rivero-Angeles, F.J. and Gomez-Ramirez, E., "Limited Modal Information and Noise Effect On Damage Detection without Baseline Modal Parameters", 27th Conference and Exposition on Structural Dynamics 2009, IMAC XXVII, 2009.
- [12] Lee, H.C., "Robust Damage Diagnostic Method Using Short Time Fourier Transform and Beating", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 9, pp. 1108-1117, 2005.
- [13] Torrence, C. and Compo, G.P., "A Practical Guide To Wavelet Analysis", Bulletin of the American Meteorological society, Vol. 79, No. 1, pp. 61-78, 1998.
- [14] Kaiser, G., "A Friendly Guide to Wavelets", Third ed., Springer Science & Business Media, Boston, pp. 3-33, 2010.
- [15] Qin, Y. and Zhang, S. and Zhang, C., "Combining kNN Imputation and Bootstrap Calibrated: Empirical Likelihood for Incomplete Data Analysis", Exploring Advances in Interdisciplinary Data Mining and Analytics: New Trends, Chapter 16, pp. 278, 2011.
- [16] Heil, C.E. and Walnut, D.F., "Continuous And Discrete Wavelet Transforms", SIAM review, Vol. 31, No. 4, pp. 628-666, 1989.
- [17] Burrus, C.S. and Gopinath, R.A., "Introduction To Wavelets And Wavelet Transforms", Prentice Hall, New Jersey, pp. 401-420, 1998.
- [18] Carden, E.P. and Fanning, P., "Vibration Based Condition Monitoring: A Review", Structural health monitoring, Vol. 3, No. 4, pp. 355-377, 2004.
- [19] Montalvao, D. Maia, N.M.M. and Ribeiro, A.M.R., "A Review Of Vibration-Based Structural Health Monitoring With Special Emphasis On Composite Materials", Shock and Vibration Digest, Vol. 38, No. 4, pp. 295-326, 2006.
- [20] 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.
- [21] Hu, H. Wang, B.T. Lee, C.H. and Su, J.S., "Damage Detection Of Surface Cracks In Composite Laminates Using Modal Analysis And Strain Energy Method", Composite Structures, Vol. 74, No. 4, pp. 399-405, 2006.
- [22] Hu, H. and Wu, C., "Development Of Scanning Damage Index For The Damage Detection Of Plate Structures Using Modal Strain Energy Method", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 23, No. 2, pp. 274-287, 2009.
- [23] Marwala, T., "Finite Element Model Updating Using Computational Intelligence Techniques: Applications To Structural Dynamics", Springer Science & Business Media, Johannesburg, pp. 203-224, 2010.
- [24] Engelbrecht, A.P., "Computational Intelligence: An Introduction", Second ed., John Wiley & Sons, South Africa, pp. 1-14, 2007.
- [25] Koza, J.R., "Survey Of Genetic Algorithms And Genetic Programming", Wescon Conference Record, Western Periodicals Company, pp. 589-594, 1995.
- [26] Mottershead, J. and Friswell, M., "Model Updating In Structural Dynamics: A Survey", Journal of sound and vibration, Vol. 167, No. 2, pp. 347-375, 1993.



شکل ۲۳ شناسایی مکان دقیق عیب توسط فرایند بروزسانی مدل

۶- نتیجه گیری و جمع بندی

در کار حاضر یک روش هیبریدی برای شناسایی عیب تورق در صفحات کامپوزیتی چندلایه بمنظور کاهش اثر نویز در فرآیند عیب‌یابی ارائه شده است. از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یکی از بهترین و متداول‌ترین روش‌های فرابابتکاری برای حل مسائل بهینه‌سازی در این فعالیت استفاده شده است. به منظور اجرای این الگوریتم کلیه کد نویسی‌های مربوطه در نرم افزار متلب نوشته و اجرا شده است. برای شبیه سازی صفحات کامپوزیتی مورد مطالعه نیز از نرم افزار آنسیس استفاده شده است. نمونه‌های مورد بررسی در قالب ۸ سناریوی عیب برای بررسی سه پارامتر محل عیب تورق، شماره لایه و شدت آن در نظر گرفته شده‌اند. با مطالعه این نمونه‌ها و پیاده سازی روش ارائه شده روی آن‌ها به‌طور کلی نتایج زیر حاصل شده است:

- پایداری حل بروزسانی در روش هیبریدی نسبت به وجود نویز روی شکل مودها به‌طور قابل ملاحظه ای افزایش می‌یابد.
- به‌طور کلی با افزایش تعداد شکل مود مورد استفاده در محاسبات عیب‌یابی، پایداری به نویز در دو روش کلاسیک و هیبریدی افزایش می‌یابد.
- در صورت وجود نویز بر حسب درصدی ثابت از هر شکل مود روی آن، با افزایش تعداد شکل مود مورد استفاده در محاسبات عیب‌یابی، علیرغم روند کلی صعودی نمودار پایداری، در هر دو روش میزان پایداری به نویز لزوماً بهبود نمی‌یابد (استفاده از برخی شکل مودها اثر منفی بر پایداری به نویز دارد).
- به‌طور کلی، در صورت وجود عیب در گوشه‌های صفحه، عیب‌یابی نسبت به نویز از پایداری کمتری برخوردار است. همچنین عیب در لایه‌های مرکزی نسبت به لایه بیرونی نسبت به وجود نویز از پایداری کمتری برخوردار است.
- با افزایش سایز عیب پایداری نسبت به نویز افزایش می‌یابد.
- برخی از شکل مودها بیشترین تاثیر در فرآیند عیب‌یابی را دارند. لذا بمنظور عیب‌یابی در صورت در اختیار داشتن تعداد مشخصی از شکل مودها، استفاده از ترکیب‌های مختلف آن‌ها در عیب‌یابی پیشنهاد می‌شود.
- حذف نواحی نامناسب پیشنهاد شده برای تعیین محل عیب بخاطر وجود نویز از دلایل اصلی افزایش پایداری در روش هیبریدی محسوب می‌شود.

