بررسی اثر تکیه‌گاه بر تشخیص آسیب در صفحات، با استفاده از تبدیل موجک گسسته‌ی دوبعدی

مجتبی حسینی*[1]،امیرمحمد امیری[2]،پیمان بیرانوند[2]،محمد حسین ناصری فرد[3]

1- دانشیار دپارتمان عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه لرستان

2- مدرس دپارتمان عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه لرستان

3- کارشناس ارشد عمران سازه، دانشگاه آزاد یزد

* خرم آباد، Peyman51471366@gmail.com

چکیده

برای اطمینان از ایمنی سازه‌ها و سرویس‌دهی آن‌ها برای اهداف مورد نظر، همه‌ی سازه‌ها، به خصوص سازه‌های مهم، به پایش و ارزیابی مداوم و منظم نیاز دارند. به همین دلیل روش‌هایی برای پایش سازه‌ها و تشخیص آسیب‌های موجود در آن‌ها، بوجود آمده است. در این مقاله، با استفاده از روش تبدیل موجک به تشخیص آسیب‌های موجود در صفحات با شرایط تکیه‌گاهی مختلف، پرداخته می‌شود. به همین منظور یک صفحه‌ی مربع شکل به ضلع یک متر در نظر گرفته شده است و شرایط تکیه‌گاهی برای آن به صورت چهار طرف گیردار، چهار طرف مفصل، سه طرف گیردار و طره‌ای فرض می‌شود. آسیب‌ها نیز به صورت ترک‌هایی مستطیلی شکل و به روش کاهش ضخامت مدل می‌شوند. برای هر حالت تکیه‌گاهی، ترک‌هایی با عمق‌های مختلف بررسی می‌شود. در نهایت، پاسخ‌های بدست آمده از تحلیل اجزاء محدود صفحه را با استفاده از تبدیل موجک گسسته‌ی دوبعدی، تحلیل کرده و کم عمق‌ترین ترک قابل شناسایی در هر حالت تکیه‌گاهی، بدست می‌آید. مشاهده می‌شود که این روش محل ترک‌ها را به صورت نقاط اوج و تغییرات ناگهانی در نمودار ضرایب موجک نشان می‌دهد و اینکه در حالت چهار طرف گیردار ترک‌هایی تا عمق نسبی یک درصد، در حالت سه طرف گیردار ترک‌هایی تا عمق نسبی سه درصد، در حالت چهار طرف مفصل ترک‌هایی تا عمق نسبی شش درصد و در حالت طره‌ای نیز ترک‌هایی تا عمق نسبی 30 درصد، قابل شناسایی هستند. مشاهده می‌شود که با افزایش گیرداری صفحه، توانایی روش مطرح شده در شناسایی ترک‌های ریز بیشتر می‌شود. نتایج بدست آمده برای طراحی و ارزیابی سازه‌های صفحه‌ای شکل و جلوگیری از تشکیل و پیش‌روی ترک‌های ریز در آن‌ها مفید است.

کلیدواژگان

تشخیص آسیب، صفحه، تبدیل موجک، ترک

Investigate the Effect of Support on Damage Detection in Plates, Using Two-Dimensioal Discrete Wavelet transform

Mojtaba Hosseini[1*], Amir Mohammad Amiri [2], Peyman Beiranvand[2],M.H. Naseri Fard[3]

1- Associate professor,Department of Civil Engineering,Faculty of Engineering Lorestan University-khorramabad-Iran

2- Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Lorestan University-Iran

3- MA Civil Structures , Islamic Azad Yazd

* Postal code:68137-17133.P.o.box:465 ,Khorram abad,Iran.(Peyman51471366@gmail.com)

Abstract

To ensure the safety of structures and their serviceability for the sightly purposes, all structures, especially important structures, needs continuous and regular evaluation and monitoring. For this reason, methods for monitoring and damages detection in structures, has emerged. In this article, using wavelet transform method, damages detection in plates with different supporting conditions, is discussed. For this reason, a squre plate with one meter side is considered and supposes its support conditions as four fixed sides, four bearing sides, three fixed sides and cantilever. Damages modeled by rectangular cracks with thickness reduction method. For each supporting state, cracks with different depth checked. Finally, obtained responses from plate finite element analysis, using two-dimensional discrete wavelet transform, analyze and detectable most shallow crack, at any supporting state, is obtained. It can be seen that, this method shows the crack locations by peak points and abrupt changes in wavelet coefficient graph, and that in four fixed sides state, cracks down to one percent relative depth, in three fixed sides state, cracks down to three percent relative depth, in four bearing sides state, cracks down to six percent relative depth and in cantilever state, cracks down to 30 percent relative depth, are detectable. It can be seen that, by increasing the plate fixity, ability of the proposed method to detect tiny cracks will further. The obtained results are useful for design and evaluation of plate form structures and prevent the formation and progression of tiny cracks.

Keywords

Damage Detection, Plate, Wavelet Transform, crack

1- مقدمه

در طول عمر خدمت‌دهی سازه‌های مهندسی، اغلب آسیب یا آسیب‌هایی دیده می‌شود، که ممکن است بر اثر مرور زمان یا بارهای سازه‌ای اضافی مانند زلزله‌ها، بادها و ترافیک بوجود آیند. به منظور افزایش ضریب ایمنی و قابلیت نگه‌داری سازه‌های جدید و موجود، پایش سلامت سازه-ها[1] به طرز رو به افزایشی به عنوان یک روش قابل اعتماد، کارآمد و اقتصادی، برای نظارت بر عملکرد سازه، تشخیص آسیب، ارزیابی سلامت و قابلیت استفاده‌ی سازه و به موقع با خبر شدن و در نتیجه تصمیم-گیری به موقع و درست، اهمیت پیدا کرد. یک پایش مطلوب آسیب‌های سازه‌ای را در مراحل اولیه‌ی شکل‌گیری تشخیص می‌دهد.

[1] Structural Health Monitoring (SHM)

آسیب‌ها اکثراً موجب بروز تأثیرات سازه‌ای درازمدت یا کوتاه‌مدت نظیر کاهش مقاومت، کاهش سختی، کاهش شکل‌پذیری، از بین رفتن پایداری سازه و موارد مشابه می‌شوند. اگر بتوان با روش‌هایی این آسیب‌ها را در خود عضو شناسایی کرد، آنگاه می‌توان بر اساس تشخیص مبتنی بر تحلیل شرایط خرابی سازه، عضو را تعمیر و یا حتی تعویض کرده و از خرابی‌های کلی و بزرگتر سازه جلوگیری کرد و در عین حال عمر مفید خدمت‌دهی سازه، اعم از فنی یا عملکردی یا اقتصادی آن را، افزایش داد. این امر اهمیت روش‌های تشخیص آسیب را نمایان می‌کند.

یکی از روش‌هایی که از اوایل دهه‌ی گذشته برای تشخیص آسیب مورد استفاده قرار گرفته، روش تبدیل موجک[1] است. در این روش، پاسخ ارتعاشی یا استاتیکی یک سازه در نقاط متعددی از سازه در یک زمان معین برداشت می‌شود (که در واقع یک سیگنال است)، سپس پاسخ‌ها با تبدیل موجک تحلیل می‌شوند و در نتیجه می‌توان محل هرگونه آسیب و خرابی را بر روی گراف ضرایب موجک، به صورت نقاط اوج و تغییرات ناگهانی تشخیص داد.در سال‌های اخیر در شاخه‌های متفاوت و زیادی از روش تبدیل موجک استفاده شده است. از جمله تحقیقاتی که در زمینه‌ی صفحات انجام شده است، می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد.

دوکا و همکاران [1]، یک صفحه با ترک سراسری موازی با یک ضلع، مدل کردند و با استفاده از تابع موجک پیوسته‌ی Sym4 قابلیت این روش را در کشف محل ترک، نشان دادند. چن و چانگ [2]، سیگنال‌های توزیع شده‌ی مکانی صفحه‌ی آسیب‌دار مستطیلی را به روش اجزاء محدود بدست آوردند. ویژگی مهم این مقاله مدلسازی دوبعدی ترک و تبدیل موجک دوبعدی است، همچنین از کاهش سختی برای مدلسازی آسیب استفاده شد. لوتریدیس و همکاران [3]، مودهای ارتعاشی صفحه‌ی ترک‌دار را به‌وسیله‌ی موجک تحلیل کردند و محل و اندازه‌ی ترک را به‌دست آوردند. روکا و وایلد [4]، یک صفحه‌ی آسیب-دار فولادی چهارطرف گیردار را به صورت تجربی مورد آزمایش قرار دادند. برای تحلیل این صفحه از تبدیل موجک پیوسته‌ی دوبعدی، استفاده کردند و نشان دادند که بدون اطلاع از مشخصات سازه، می‌توان محل آسیب را تعیین کرد. بایسا و همکاران [5]، با استفاده از تبدیل موجک پیوسته و پاسخ به‌دست آمده از گشتاورهای هر گره، تابع چگالی انرژی تاریخچه فرکانسی را برای تشخیص آسیب در یک صفحه‌ی بتنی و سپس به‌طور جداگانه در تیر حمال فولادی یک پل استفاده کردند.

در پژوهش بعدی، فان و کیائو [6]، با ارائه یک الگوریتم جدید و با استفاده از تبدیل موجک پیوسته‌ی دوبعدی، به صورت تئوری و آزمایشگاهی، یک صفحه‌ی طره‌ای را تحلیل کردند و محل آسیب را نشان دادند. روکا و وایلد [7]، با ترکیب تبدیل موجک پیوسته و شبکه عصبی مصنوعی، یک روش جدید برای تشخیص آسیب، ارائه کردند. در ادامه برای نشان دادن کارایی این روش یک آزمایش تجربی نیز طراحی کردند و صحت نتایج مدلسازی خود را ثابت کردند. کاتونین [8]، با معرفی یک تانسور تولید کننده‌ی موجک‌های بی-اسپلاین و با استفاده از تبدیل موجک دوبعدی گسسته، روشی برای تشخیص آسیب در صفحات کامپوزیتی ارائه کرده است. مالیکارجونا و سوارنامانی [9]، برای تشخیص آسیب در یک صفحه‌ی چهار طرف گیردار، با وارد کردن شکل مودی و انرژی کرنشی به عنوان داده‌های اولیه، از تبدیل موجک فضایی، استفاده کردند. لیانگ و ژیانگ [10]، با استفاده از تبدیل موجک پیوسته‌ی دوبعدی و بر روی یک صفحه‌ی چهار طرف مفصل، یک روش دو مرحله‌ای برای تشخیص آسیب در صفحاتی با آسیب‌های چندگانه ارائه دادند. فو و همکاران [11]، بر اساس پاسخ دینامیکی مدل اجزاء محدود یک صفحه، یک آسیب که به صورت کاهش در ضریب الاستیسیته مدلسازی شده بود را تعیین محل کردند.

در اکثر پژوهش‌های انجام شده از تبدیل موجک پیوسته استفاده شده است، که باید گفت تبدیل موجک پیوسته دارای اطلاعات زائد و اضافی است که باعث افزایش بی دلیل بار محاسبات، نقاط نمونه‌برداری و در نتیجه هزینه، می‌شود. همچنین آسیب در نظر گرفته شده بیشتر به صورت کاهش سختی در یک محل، مدل شده است و فقط برای یک حالت تکیه‌گاهی بررسی صورت گرفته است.اما در پژوهش حاضر از تبدیل موجک گسسته‌ی دوبعدی[2] استفاده شده است، که با این کار تعداد نمونه‌برداری‌ها نصف می‌شود و در نتیجه بار محاسبات و هزینه کاهش می-یابد. همچنین آسیب نیز به صورت یک ترک ریز در نظر گرفته شده و بررسی‌ها برای یک صفحه با چهار حالت تکیه‌گاهی انجام شده است، که با در نظر گرفتن چندین عمق مختلف برای ترک، تفاوت‌های کشف آسیب و ریزترین ترک قابل شناسایی در هر حالت تکیه‌گاهی، با استفاده از روش تبدیل موجک نشان داده می‌شود. برای مدلسازی صفحات و

[1] Wavelet Transform

[2] Two-dimensional discrete wavelet transform (dwt2).

بدست آوردن پاسخ‌ها از نرم‌افزار ANSYS و برای تحلیل پاسخ‌ها از نرم-افزار MATLAB استفاده می‌شود. محل آسیب‌ها به صورت نقاط اوج و تغییرات ناگهانی در نمودار ضرایب موجک نشان داده می‌شود.

2- تعریف ریاضی تابع موجک

در این بخش تابع موجک به صورت خلاصه معرفی می‌شود، برای توضیحات بیشتر به مراجع [3] و [12]، رجوع شود.

در واقع، هدف از اعمال یک تبدیل ریاضی بر یک سیگنال، بدست آوردن اطلاعات مخفی و اضافه‌ای است که در سیگنال خام، قابل دستیابی نیستند.

تبدیل ویولت یک روش جدید و کارآمد برای تحلیل سیگنال‌ها است، که یک سیگنال را به یک سری از امواج کوچک تبدیل می‌کند و نواقص تبدیل فوریه را در تحلیل سیگنال برطرف می‌کند. ویولت، به معنی موج کوچک است و موجک معادلی مناسب برای آن است.

تابع موجک، تابعی است که دو ویژگی مهم دارد: نوسانی بودن و کوتاه مدت بودن. $\Psi(x)$ تابع موجک است، اگر و فقط اگر تبدیل فوریه‌ی آن، یعنی $\Psi(w)$، شرط زیر را ارضا کند:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(w)|^2}{|w|^2}\, dw \langle +\infty \qquad (1)$$

$\Psi(x)$ تابع موجک مادر است. طبق رابطه‌ی زیر توابع موجک مورد استفاده در تحلیل با دو عمل ریاضی انتقال و مقیاس در طول سیگنال مورد تحلیل، تغییر اندازه و محل می-یابند:

$$\Psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}}\, \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \qquad (2)$$

$\Psi_{a,b}(x)$ تابع موجک پیوسته، b پارامتر انتقال و a پارامتر مقیاس است. در نهایت تبدیل موجک پیوسته‌ی تابع f(x)، از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\, \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\, \Psi_{a,b}(x)\, dx \qquad (3)$$

در تحلیل سیگنال از فرم دیگری از تبدیل موجک با نام تبدیل موجک گسسته، نیز استفاده می‌شود. در تبدیل موجک گسسته پارامترهای انتقال و مقیاس به‌طور غیرپیوسته انتخاب می‌شوند، به‌طوری که:

$$a = 2^{-j} \quad , \quad b = 2^{-j}\, k \qquad (4)$$

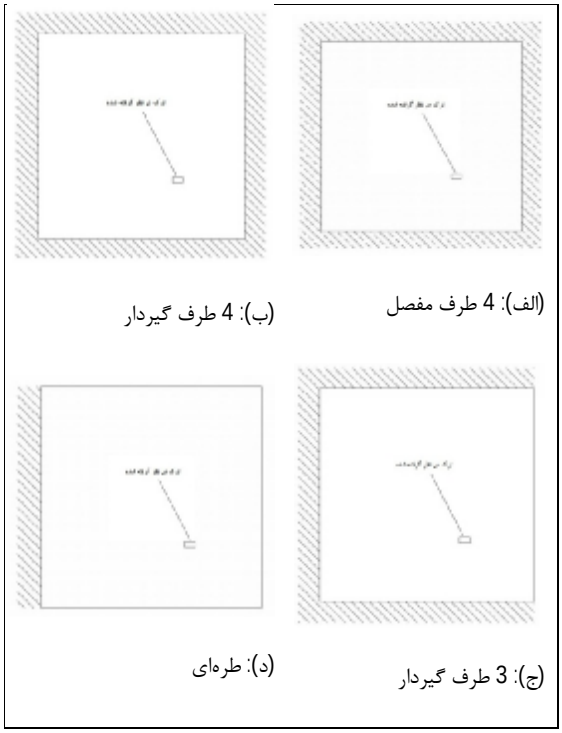
که j و k اعداد صحیح هستند. در نتیجه با جایگذاری به جای a و b خواهیم داشت:

$$\Psi_{j,k}(x) = 2^{\frac{j}{2}}\, \Psi\left(2^j x - k\right) \qquad (5)$$

ساخت موجک‌های دوبعدی، تعمیم مستقیم حالت یک‌بعدی است. همان‌طور که گفته شد، در این مقاله از تبدیل موجک دوبعدی گسسته، در بدست آوردن ضرایب موجک استفاده می‌شود.

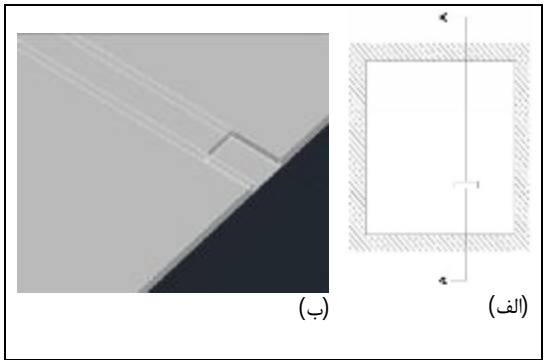
3- مدلسازی

صفحه‌ی در نظر گرفته شده در هر حالت تکیه‌گاهی، یک مربع به ضلع 1000 میلی‌متر و ضخامت 10 میلی‌متر است. هر یک از صفحات، دارای ضریب پواسون 0/3، ضریب الاستیسیته‌ی 2×10^9 کیلوگرم بر میلی‌متر مربع و جرم حجمی $2/4 \times 10^7$ کیلوگرم بر میلی‌متر مربع، است. بار وارد بر هر صفحه به صورت گسترده و به مقدار 2 تن بر متر مربع، در نظر گرفته شده است. بجز وضعیت تکیه‌گاهی، دیگر مشخصات صفحات در همه‌ی حالت‌ها یکسان است.در شکل (1)، چهار حالت تکیه‌گاهی برای صفحه‌ی در نظر گرفته شده و محل آسیب موجود بر آن‌ها نشان داده شده است.



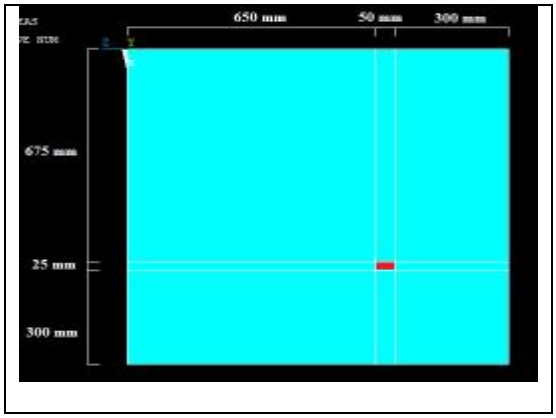
شکل1 صفحه‌ی در نظر گرفته شده با چهار حالت تکیه‌گاهی (الف، ب، ج و د)، و ترک موجود بر آن.

آسیب در نظر گرفته شده بر روی هر صفحه، یک ترک مستطیلی شکل است که به روش کاهش ضخامت صفحه در این محل، مدلسازی شده است. جنس و مشخصات صفحه در محل ترک مشابه دیگر نقاط صفحه است. در شکل (2)، با یک برش در محل ترک، نحوه‌ی مدلسازی ترک در نرم‌افزار ANSYS، نشان داده شده است.



شکل 2 نحوه‌ی مدلسازی ترک، (الف): مقطع A-A که از محل ترک عبور می-کند، (ب): نمایش سه بعدی مقطع A-A.

البته مشخص است که مدلسازی ترک به صورت یک مکعب مستطیلی شکل، با واقعیت مطابقت ندارد و خطاهایی در نتایج بوجود می‌آورد، که این روش مدلسازی به دلیل محدودیت روش دوبعدی تبدیل موجک است. اما باید گفت که با توجه به اهداف دنبال شده در این مقاله، شکل ترک تأثیر زیادی در نتایج ندارد، ضمن اینکه می‌توان این شکل ترک را از نوع لغزشی یا برشی نیز در نظر گرفت.در شکل (3)، اندازه و محل ترک، که برای هر چهار حالت تکیه‌گاهی و در همه‌ی صفحات یکسان فرض شده، نشان داده شده است.



شکل 3 موقعیت و اندازه‌ی ترک موجود بر صفحه.

همان طور که گفته شد برای تحلیل اجزاء محدود و بدست آوردن پاسخ‌های صفحه، از نرم‌افزار ANSYS استفاده می‌شود، که در آن هر ضلع صفحه را به 40 المان تقسیم کرده و در مجموع 1681 گره بوجود می‌آید. سپس با تحلیل استاتیکی صفحه، خیز هر گره بدست می‌آید. برای بررسی اثر مورد نظر بر کشف محل ترک، پاسخ‌های بدست آمده را به صورت یک ماتریس 41 × 41، وارد نرم‌افزار MATLAB کرده و با استفاده از تبدیل موجک گسسته‌ی دوبعدی، داده‌ها تحلیل شده و نتایج به صورت نمودارهای ضرایب موجک نشان داده می‌شوند.

لازم به ذکر است که انتخاب مناسب‌ترین تابع موجک مادر نیز، موردی مهم در استفاده از تبدیل موجک است، که در اینجا با توجه به نتایج بدست آمده از مرجع [1] و بررسی‌های انجام شده توسط نویسندگان مقاله‌ی حاضر، تابع موجک sym4، برای تحلیل‌های مورد نظر استفاده شده است.برای تحلیل پاسخ‌ها، از یک فایل متنی، حاوی روابط مختلف استفاده شده است، که رابطه‌ی اصلی آن، رابطه‌ی (6) است:

$$[\,cA, cH, cV, cD\,] = dwt2(f2, 'sym4') \quad (6)$$

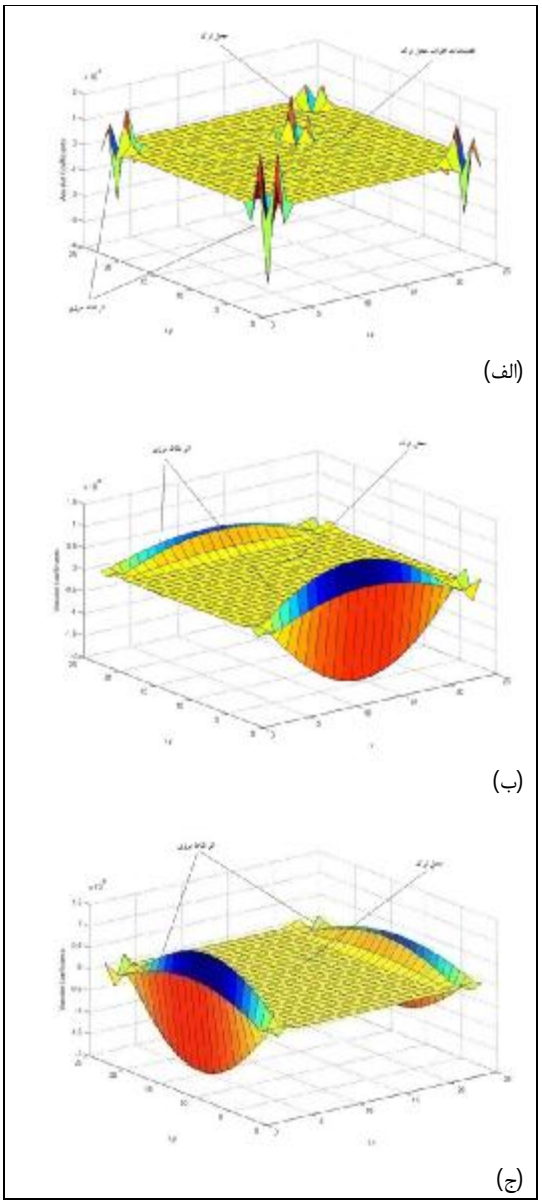
f2 ماتریسی 41 × 41، متشکل از پاسخ‌های بدست آمده از ANSYS است. این رابطه، شامل روش تحلیل (تبدیل موجک گسسته‌ی دوبعدی)، تابع موجک مادر، ماتریس پاسخ‌ها و ماتریس‌های ضرایب موجک است.

در این روش، پاسخ‌های صفحه که در یک زمان خاص بدست آمده‌اند، به عنوان یک سیگنال دوبعدی به MATLAB معرفی می-شود. با استفاده از تبدیل موجک گسسته‌ی دوبعدی، سیگنال وارد شده به دو قسمت تقریب‌ها[1] و جزئیات[2]، تقسیم می‌شود. تقریب‌ها، مؤلفه‌های فرکانس پایین و مقیاس بالای سیگنال هستند و جزئیات، مؤلفه‌های فرکانس بالا و مقیاس پایین سیگنال هستند. قسمت جزئیات به سه ماتریس ضرایب موجک تقسیم شده که شامل جزئیات قطری[3]، افقی[4] و عمودی[5]، است. که نتایج تحلیل بر روی این سه ماتریس، در ادامه آمده است.

در قسمت‌های (3-1) تا (3-4)، نتایج مدلسازی صفحات، به صورت نمودارهای سه بعدی و دوبعدی ضرایب موجک آمده است. در هر قسمت و برای هر حالت تکیه‌گاهی، موارد زیادی مورد بررسی قرار گرفت تا به حداقل عمقی که توسط روش گفته شده قابل شناسایی باشد، دست یافت. به همین دلیل از آوردن همه‌ی نتایج و نمودارها خودداری شده و برای هر حالت تکیه‌گاهی فقط دو مورد آورده شده است.

3-1- صفحه‌ی چهار طرف مفصل

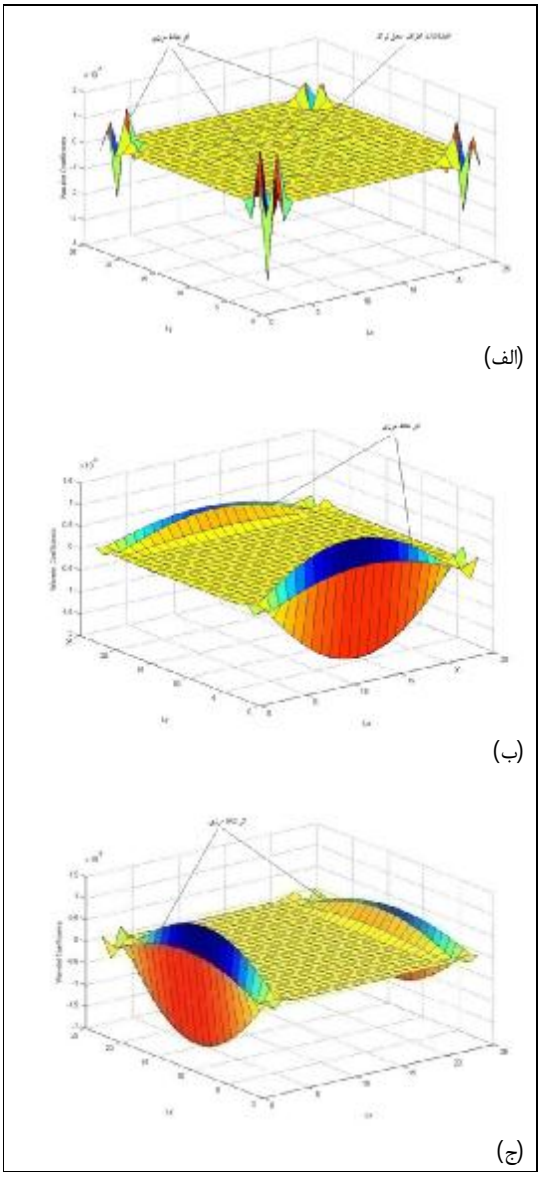
در این قسمت، ابتدا ترک با عمق نسبی (عمق ترک بر ضخامت صفحه) 50 درصد در نظر گرفته می‌شود، که نتایج آن در شکل (4) و به صورت نمودارهای سه بعدی ضرایب موجک، آمده است.



شکل 4 نمودارهای سه بعدی ضرایب موجک برای صفحه‌ی چهار طرف مفصل با ترکی به عمق 50 درصد. (الف)، (ب) و (ج): به ترتیب نمایش سه بعدی از ماتریس ضرایب موجک جزئیات قطری، افقی و عمودی.

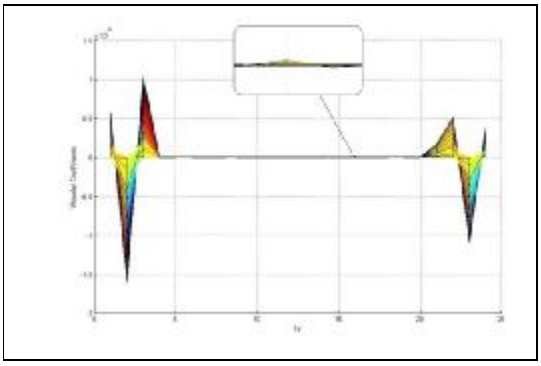
با بررسی صفحات ترک‌دار مختلف، به نظر می‌رسد که برای صفحه‌ی چهار طرف مفصل، ترک‌هایی با عمق نسبی کم‌تر از شش درصد، توسط این روش قابل شناسایی نیستند، که نتایج تحلیل برای ترکی به عمق نسبی شش درصد، در شکل (5) آمده است.

[1] Approximations
[2] Details
[3] 3D view of the coefficient matrices of diagonal details (cD).
[4] 3D view of the coefficient matrices of horizontal details (cH).
[5] 3D view of the coefficient matrices of vertical details (cV).



شکل5 نمودارهای سه بعدی ضرایب موجک برای صفحه‌ی چهار طرف مفصل با ترکی به عمق شش درصد. (الف)، (ب) و (ج): به ترتیب نمایش سه بعدی از ماتریس ضرایب موجک جزئیات قطری، افقی و عمودی.

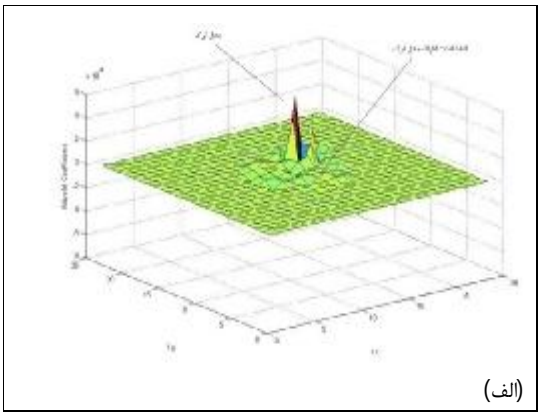
همان طور که در شکل (5) مشاهده می‌شود، برای ترک‌هایی با این عمق، با استفاده از نمایش سه بعدی نمودارهای ضرایب موجک، نمی-توان محل ترک را تشخیص داد. اما در شکل (6) با استفاده از نمایش دوبعدی و بزرگنمایی آن، محل ترک مشخص می‌شود. البته با بررسی نمودارها و نتایج بهتر نمودار cH، فقط این نمودار استفاده شده است.

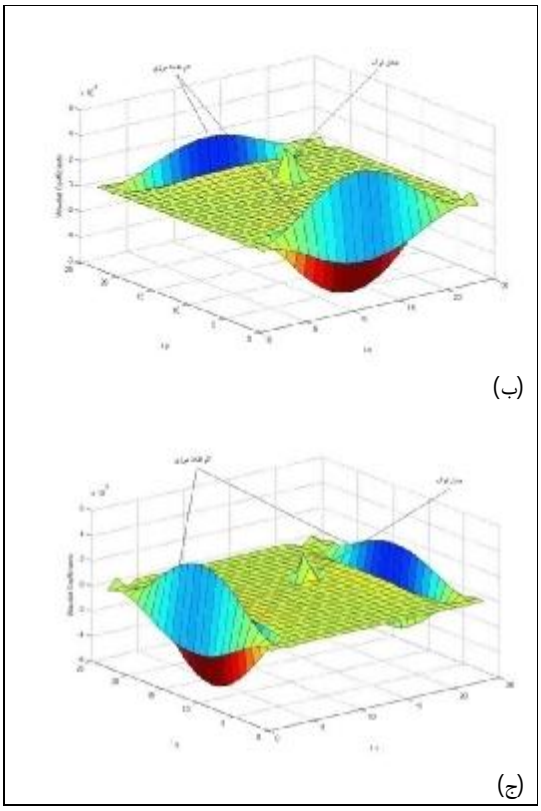


شکل 6 نمای کناری ماتریس ضرایب جزئیات افقی صفحه‌ی چهار طرف مفصل با ترکی به عمق شش درصد. محل ترک به صورت اغتشاش در ضرایب موجک است، که با بزرگنمایی نشان داده شده است.

3-2- صفحه‌ی چهار طرف گیردار

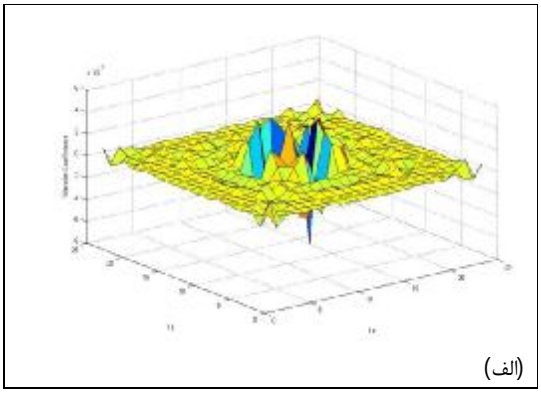
ابتدا صفحه‌ای با ترکی به عمق نسبی 50 درصد در نظر گرفته می‌شود، که محل ترک به خوبی مشخص است. نتایج در شکل (7) آمده است.

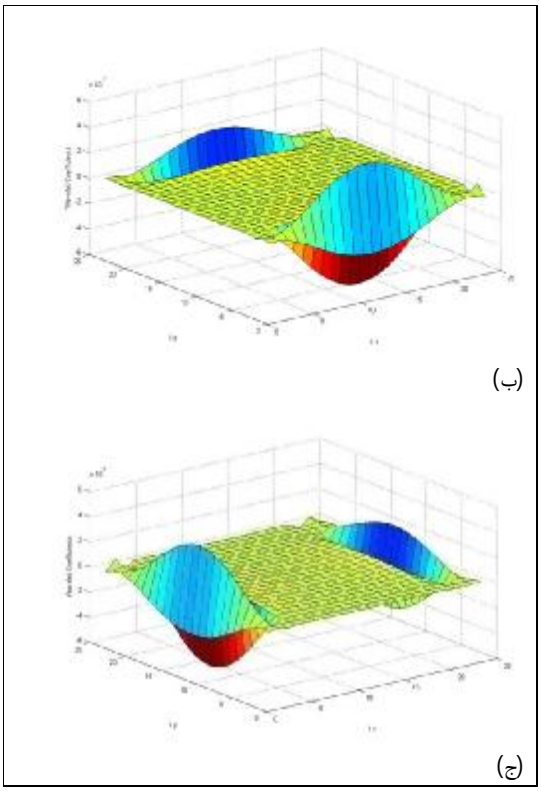




شکل 7 نمودارهای سه بعدی ضرایب موجک برای صفحه‌ی چهار طرف گیردار با ترکی به عمق 50 درصد. (الف)، (ب) و (ج): به ترتیب نمایش سه بعدی از ماتریس ضرایب موجک جزئیات قطری، افقی و عمودی.

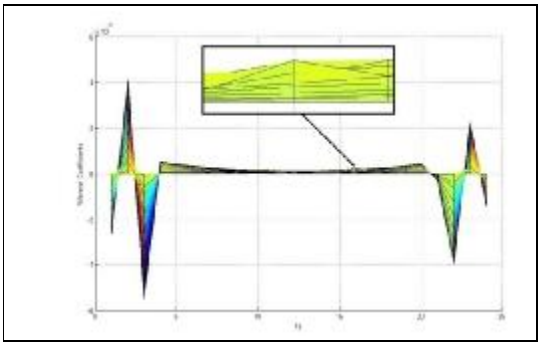
با بررسی صفحات ترک‌دار مختلف، کم‌ترین عمقی که توسط این روش قابل شناسایی است، بدست آورده می‌شود. در شکل (8)، نتایج صفحه‌ی چهار طرف گیردار با ترکی به عمق یک درصد نشان داده شده است.





شکل 8 نمودارهای سه بعدی ضرایب موجک برای صفحه‌ی چهار طرف گیردار با ترکی به عمق یک درصد. (الف)، (ب) و (ج): به ترتیب نمایش سه بعدی از ماتریس ضرایب موجک جزئیات قطری، افقی و عمودی.

مشاهده می‌شود که برای ترک‌هایی با عمق یک درصد، با استفاده از نمایش سه بعدی نمودارهای ضرایب موجک، نمی‌توان محل ترک را تشخیص داد. اما در شکل (9)، با استفاده از نمایش دوبعدی و بزرگنمایی آن، محل ترک مشخص می‌شود. مثل قسمت قبل فقط از نمودار cH استفاده شده است.

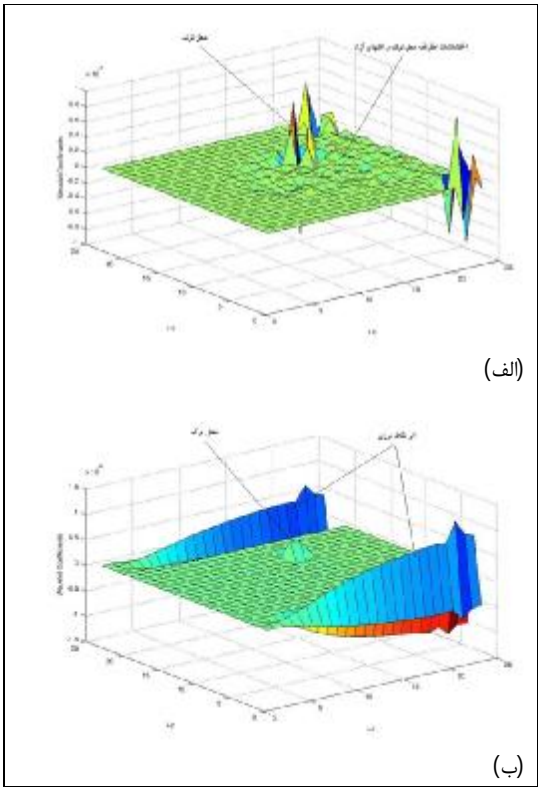


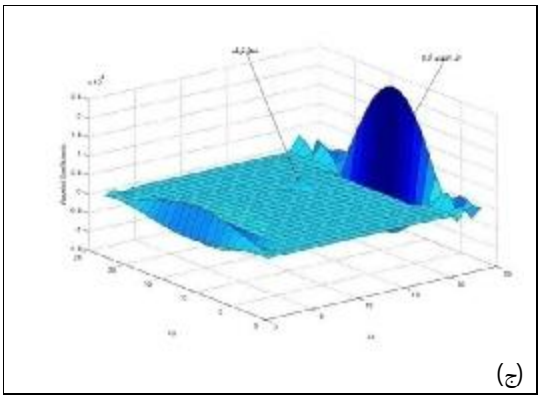
شکل9 نمای کناری ماتریس ضرایب جزئیات افقی صفحه. محل ترک به صورت اغتشاش در ضرایب موجک است، که با بزرگنمایی نشان داده شده است.

به نظر می‌رسد که عمق نسبی یک درصد، کم‌ترین عمقی است که در یک صفحه‌ی چهار طرف گیردار، توسط تبدیل موجک قابل شناسایی است. البته عمق‌های کم‌تر از این مقدار نیز مورد بررسی قرار گرفت، که به دلیل بوجود آمدن اغتشاشات بسیار ریز در سطح نمودار، تشخیص محل ترک از این اغتشاشات تقریباً غیر ممکن بود.

3-3- صفحه‌ی سه طرف گیردار

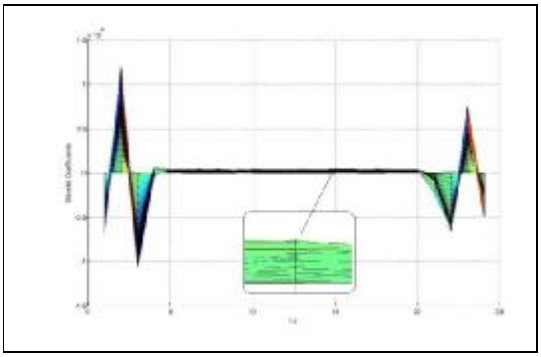
در این قسمت نیز ابتدا صفحه را با ترکی به عمق نسبی 50 درصد در نظر گرفته و محل ترک نشان داده می‌شود، که نتایج در شکل (10) آمده است.





شکل 10 نمودارهای سه بعدی ضرایب موجک برای صفحه‌ی سه طرف گیردار با ترکی به عمق 50 درصد. (الف)، (ب) و (ج): به ترتیب نمایش سه بعدی از ماتریس ضرایب موجک جزئیات قطری، افقی و عمودی.

با بررسی‌های انجام شده بر روی این صفحه، به نظر می‌رسد که ریزترین ترکی که توسط روش گفته شده قابل شناسایی است، ترکی با عمق نسبی سه درصد است، که با توجه به نتایج قسمت‌های (3-1) و (3-2)، نمودارهای سه بعدی مربوطه آورده نشده است، و در شکل (11) فقط نمودار دوبعدی cH مشاهده می‌شود، که در آن محل ترک با بزرگنمایی نشان داده شده است.

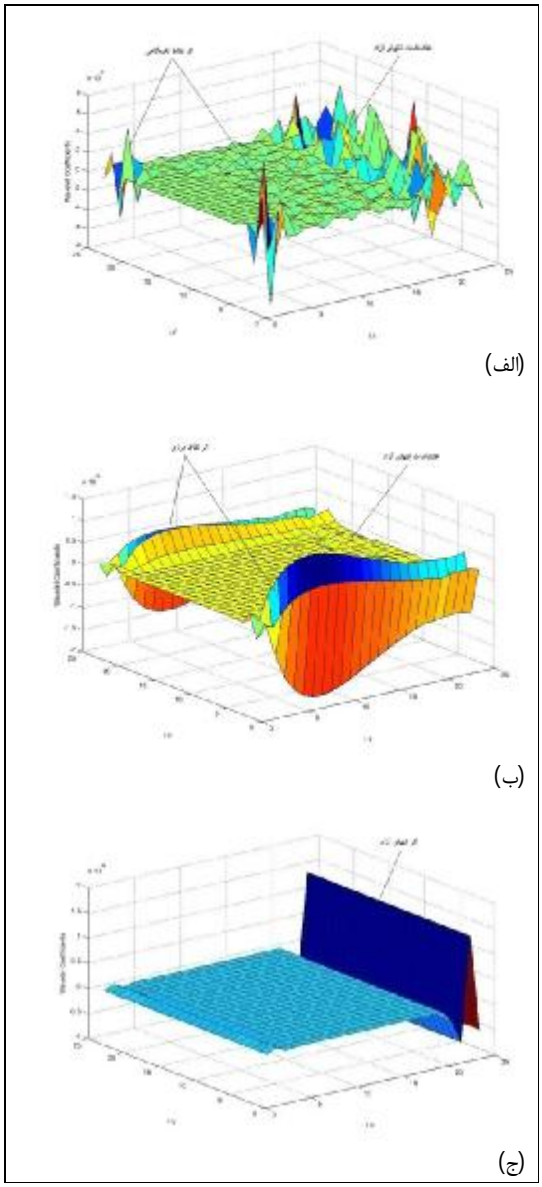


شکل 11 نمای کناری ماتریس ضرایب جزئیات افقی صفحه‌ی سه طرف گیردار با ترکی به عمق سه درصد. محل ترک به صورت اغتشاش در ضرایب موجک است، که با بزرگنمایی نشان داده شده است.

3-4- صفحه‌ی طره‌ای

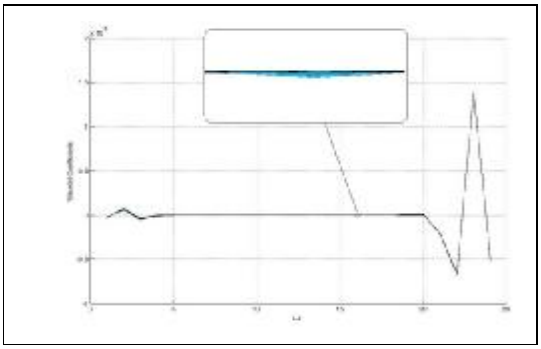
شکل (12)، نمودارهای سه بعدی ضرایب موجک را برای صفحه‌ی طره-ای با ترکی به عمق 50 درصد، نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود برخلاف قسمت‌های قبل در صفحاتی با این وضعیت تکیه‌گاهی، حتی ترک‌های نسبتاً عمیق نیز به وضوح مشخص نیستند. در

نمودارهای cD و cH اغتشاشات اضافی زیادی دیده می‌شود، که تشخیص محل ترک را سخت می‌کنند.



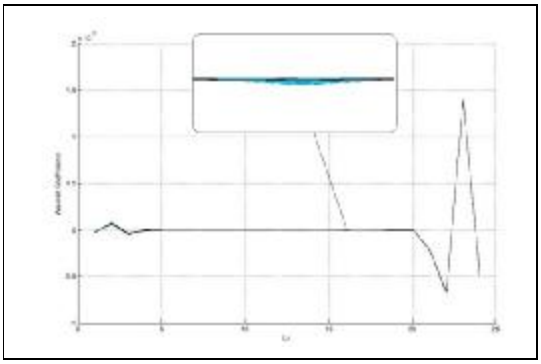
شکل 12 نمودارهای سه بعدی ضرایب موجک برای صفحه‌ی طره‌ای با ترکی به عمق 50 درصد. (الف)، (ب) و (ج): به ترتیب نمایش سه بعدی از ماتریس ضرایب موجک جزئیات قطری، افقی و عمودی.

برای شناسایی محل ترک باید نمودارهای دوبعدی ضرایب موجک را بزرگنمایی کرده و محل ترک را تشخیص داد، که در این حالت برخلاف قسمت‌های قبل که از نمودار cH استفاده می‌شد، با نمایش نمودار دوبعدی cV و بزرگنمایی آن، محل ترک مشخص می‌شود، که در شکل (13) مشاهده می‌شود.



شکل 13 نمای کناری ماتریس ضرایب جزئیات عمودی صفحه‌ی طره‌ای با ترکی به عمق 50 درصد. محل ترک به صورت اغتشاش در ضرایب موجک است، که با بزرگنمایی نشان داده شده است.

به نظر نمی‌رسد که در صفحاتی با این وضعیت تکیه‌گاهی بتوان ترک-های ریز را شناسایی کرد، به همین دلیل با بررسی ترکی با عمق نسبی 30 درصد و در نتیجه وضوح پایین محل آن، این عمق، کم‌ترین عمق قابل شناسایی است، که در شکل (14) نشان داده شده است.



شکل 14 نمای کناری ماتریس ضرایب جزئیات عمودی صفحه‌ی طره‌ای با ترکی به عمق 30 درصد. محل ترک به صورت اغتشاش در ضرایب موجک است، که با بزرگنمایی نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که نمودار cD، فاقد اغتشاشات اضافی در محل تکیه-گاه‌ها است، ولی در محل لبه‌های آزاد اغتشاشاتی زیاد و نسبتاً شدید دارد. این نمودار برای تشخیص ترک‌های عمیق، نموداری مناسب است، اما برای صفحاتی با ترک‌های ریز، به دلیل بوجود آمدن اغتشاشات زیاد در وسط صفحه و لبه‌های آزاد، عملکرد مناسبی ندارد.

اما نمودارهای cH و cV در محل تکیه‌گاه‌ها تحت تأثیر اثر نقاط مرزی هستند و دارای اغتشاشات اضافی در محل تکیه‌گاه‌ها هستند. این دو نمودار بجز در محل تکیه‌گاه‌ها و البته در محل لبه‌های آزاد، در دیگر نقاط فاقد اغتشاشات اضافی و مزاحم هستند و فقط محل آسیب‌ها را با نقاط اوج نشان می‌دهند. به طوری که برای تشخیص ترک‌ها و آسیب-های ریز می‌توان از این نمودارها استفاده کرد.

البته پیشنهاد می‌شود نتایج هر سه نمودار مورد بررسی قرار گیرد و از هر سه نمودار استفاده شود.

4- نتیجه گیری

به طور کلی برای تشخیص آسیب در سازه‌ها باید عوامل زیادی را مد نظر قرار داد و سعی شود که مناسب‌ترین روش تشخیص آسیب را بکار گرفت. در این مقاله با ارزیابی کیفی صفحات آسیب‌دار و با در نظر گرفتن حالت‌های تکیه‌گاهی مختلف برای آن‌ها، با استفاده از روش تبدیل موجک گسسته‌ی دوبعدی، به تعیین محل آسیب موجود در صفحات پرداخته شد. شباهت‌ها و تفاوت‌های تشخیص آسیب در هر حالت تکیه‌گاهی بررسی شد و نیز ریزترین آسیب قابل شناسایی با استفاده از روش گفته شده، بدست آمد. می‌توان گفت با افزایش گیرداری صفحات، توانایی روش تبدیل موجک گسسته در تشخیص آسیب‌های ریز افزایش می‌یابد.

با استفاده از روش مطرح شده و نتایج بدست آمده از آن، بدون نیاز به محاسبات اضافی، محل آسیب مشخص می‌شود، و در عین حال نیازی به پاسخ‌ها و بررسی قبلی سازه‌ی سالم وجود ندارد. اطلاعات و داده‌ها از طریق نصب سنسورهایی در محل‌های لازم بدست می‌آیند. با تحلیل داده‌ها، می‌توان محل، شدت و حتی عمق آسیب را بدست آورد، که البته در اینجا دو مورد اول مورد بررسی قرار گرفت.

5- مراجع

[1] Douka E., Loutridis S.; Trochidis A.; "*Crack Identification In Plates Using Wavelet Analysis*", Journal of Sound and Vibration, 270, 2002, 279-295.

[2] Chang Chih-Chieh., Chen Lien-Wen.; "*Damage Detection Of Rectangular Plate By Spatial Wavelet Based Approach*", Applied Acoustics, 65, 2004, 819-832.

[3] Loutridis S., Douka E.; Hadjileontiadis L J.;Trochidis A.; "*A Two-Dimensional Wavelet Transform For Detection Of Cracks in Plates*", Engineering Structures, 27, 2005, 1327-1338.

[4] Rouka M., Wilde K.; "*Application Of Continuous Wavelet Transform In Vibration Based Damage Detection Method For Beams And Plates*", Journal of Sound and Vibration, 297, 2006, 536-550.

[5] Bayissa W L., Haritos N.; Thelandersson S.; "*Vibration-Based Structural Damage Identification Using Wavelet Transform*", Mechanical Systems and Signal Processing, 22, 2007, 1194-1215.

[6] Fan Wei., Qiao Pizhong.; "*A 2-D Continuous Wavelet Transform Of Mode Shape Data For Damage Detection Of Plate Structures*", International Journal of Solids and Structures, 46, 2009, 4379-4395.

[7] Rucka Magdalena., Wilde Krzysztof.; "*Neuro-Wavelet Damaage Detection Technique In Beam, Plate And Shell Structures with Experimental Validation*", Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 48, 3, 2010, 579-604.

[8] Katunin Andrzej.; "*Damage Identification In Composite Plates Using Two-Dimensional B-Spline Wavelets*", Mechanical Systems and Signal Processing, 25, 2011, 3153-3167.

[9] Mallikarjuna Reddy D., Swarnamani S.; "*Damage Detection And Identification In Structures By Spatial Wavelet Based Approach*", International Journal of Applied Science and Engineering, 10, 1, 2012, 69-87.

[10] Xiang Jiawei., Liang Ming.; "*A Two-Step Approach To Multi-Damage Detection For Plate Structures*", Engineering Fructure Mechanics, 91, 2012, 73-86.

[11] Fu Y Z., Lu Z R.; Liu J K.; "*Damage Identification In Plates Using Finite Element Model Updating In Time Domain*", Journal of Sound and Vibration, 332, 2013, 7018-7032.

[12] Daubechies I.; "*Ten Lectures On Wavelets*", CBMS-NSF Conference Series 61, Philadelphia, 1992.