



کشف آسیب‌های صفحات با استفاده از تبدیل موجک گسسته داده‌های مودال بازسازی شده

میلاد پایسته^۱، مرتضی آقاچان نشتایی^۲، محمد طاهری نسب^{۳*}، سید بهرام بهشتی اول^۳

^۱ دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران

^۲ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

^۳ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۵ آبان ۱۳۹۶

بازنگری: ۲۹ بهمن ۱۳۹۶

پذیرش: ۱۱ اسفند ۱۳۹۶

ارائه آنلاین: ۴ اردیبهشت ۱۳۹۷

کلمات کلیدی:

کشف عیوب

تبدیل موجک گسسته

آنالیز مودال

سازه‌های صفحه‌ای

پایش سازه

چکیده: تکنیکی‌های موضعی بر اثر تغییر در سختی یا جرم ناحیه آسیب دیده به راحتی در نتایج آنالیز مودال قابل تشخیص نیستند. تبدیل موجک با تشخیص آنی تغییرات مکانی سیگنال ورودی، محل آسیب‌های سازه را تشخیص می‌دهد. هدف این پژوهش ارائه روشی جهت شناسایی آسیب در صفحات می‌باشد. لذا در یک مطالعه موردی صفحه‌ای مربعی با شرایط مرزی متقارن و دارای تکیه‌گاه گیردار مدلسازی می‌شود. روش ارائه شده در این پژوهش قادر به کشف عیوب موجود در صفحات با نسبت آسیب ۳٪ می‌باشد. در این روش حسب متقارن و یا پادمقارن بودن ماتریس کسب، هر نقطه از نتایج آنالیز مودال صفحه با نقطه متقارن نسبت به مرکز صفحه، جمع (در حالت پادمقارن) و یا از آن کم می‌شود (در حالت متقارن). نتایج نشان می‌دهد ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده در مقایسه با ضرایب موجک آنالیز مودال اصلی، آسیب‌های ریز را با وضوح بالایی نمایش می‌دهد. به علاوه نتایج نشان می‌دهد که به منظور کاهش هزینه‌های مالی پروژه می‌توان از تعداد نقاط نمونه برداری کمتری استفاده کرد مشروط بر آن که درون یابی بین نقاط به کار گرفته شود.

۱- مقدمه

پایش سازه و کشف عیوب در کوتاهترین زمان ممکن، ضرورتی است که نیاز به آن در کلیه علوم مهندسی به‌ویژه مهندسی عمران، مکانیک و هوا فضا هر روز بیش از پیش حس می‌شود. بیشتر تکنیک‌های مورد استفاده که معمولاً بر اساس بازدید چشمی یا بازدید یک نقطه خاص (همچون روش‌های صوتی، فراصوتی و اثر انعکاس موج) می‌باشد، منجر به تغییر در مشخصات مواد می‌شود. به علاوه در برخی از این روش‌ها دسترسی به محل آسیب ضروری می‌باشد، بنابراین روش‌های پایش سلامت سازه^۱ و مانیتورینگ ارتعاش محور^۲ به صورت خاص برای حذف این محدودیت‌ها ارائه و گسترش یافته‌اند. سیستم‌های پایش سلامت سازه حجم زیادی از داده‌ها را تولید می‌کنند، بنابراین پردازش داده‌ها و تفسیر نتایج تبدیل به یک مسئله چالش برانگیز شده است [۱].

در طول دو دهه گذشته مطالعات نظری، عددی و آزمایشگاهی گسترده‌ای بر روی سازه‌های معیوب، با هدف بهبود روش‌های کشف آسیب در سازه‌ها انجام شده است. وجود هر آسیب و ضعف در سازه

موجب کاهش سختی و میرایی سازه می‌شود. [۲] کاهش سختی سازه با کاهش فرکانس طبیعی سازه و تغییر در شکل مودی سازه در تعامل مستقیم قرار دارد. آنالیز مودی سازه به صورت حوزه زمانی^۳ یا حوزه فرکانسی^۴ انجام می‌شود. روش‌های مبتنی بر تحلیل زمان-قلمرو به نویزهای ناشی از وجود کلیه مولفه‌های فرکانسی در داده‌ها، حساس می‌باشند. برای غلبه بر این مشکلات روش‌های مبتنی بر آنالیز موجک^۵ ارائه شده‌اند. آنالیز موجک با اعمال پنجره‌هایی در مقیاس‌های مختلف نسبت به تبدیل فوریه کوتاه مدت^۶، می‌تواند اطلاعات مربوط به یک فرکانس مشخص و تغییرات آن در طول زمان را استخراج نماید. استفاده از آنالیز موجک به‌ویژه در رابطه با مسائل شناسایی پارامترهای سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در طول فرآیند شناسایی، خاصیت چند وضوحی آنالیز موجک می‌تواند نویزهای ناشی از پاسخ سازه را فیلتر نماید. بنابراین ضرایب تبدیل موجک می‌تواند به صورت مستقیم با پارامترهای سازه‌ای در تعامل باشند [۲]. روش‌های شناسایی

3 Time-domain

4 Frequency-domain

5 Wavelet

6 Short-time Fourier transform (STFT)

1 Structural health monitoring (SHM)

2 Vibration-based monitoring methods

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mtaherinasab@jstu.ac.ir

اسلاویک^{۱۷} و همکاران از تابع موجک گابر^{۱۸} برای تخمین نسبت میرایی استفاده نمود [۱۳].

در مطالعات متنوعی از اندازه‌گیری شکل مودی برای تشخیص آسیب استفاده شده است. پندی^{۱۹} و همکاران نشان دادند، تغییر در منحنی شکل مودی مشخص‌کننده محل آسیب می‌باشد. تغییر ناگهانی در ضرایب موجک محل آسیب را مشخص می‌کند و با استفاده از شدت این ضرایب می‌توان عمق آسیب را تشخیص داد [۱۴ و ۱۵]. سامپایو^{۲۰} و همکاران مقادیر منحنی حالت مودی سازه آسیب دیده را از سازه سالم استخراج نمودند [۱۶]. جنتیل و مسینا^{۲۱} تمرکز خود را به کشف ترک‌های باز در تیرها تحت ارتعاش متقاطع معطوف کردند [۱۷]. آنها با استفاده از کاستن داده‌های اندازه‌گیری شده و اطلاعات پایه‌ای سازه، از تبدیل موجک گسسته برای شناسایی ترک باز در تیرها استفاده نمودند. کوئک^{۲۲} و همکاران حساسیت تکنیک موجک را در کشف عیوب در تیرها مورد آزمایش قرار دادند. آنها به خصوص اثر مشخصات ترک‌های متفاوت، شرایط مرزی و توابع مختلف موجک مورد بررسی قرار دادند [۱۸]. هانگ^{۲۳} و همکاران اثر تبدیل موجک و ظرفیت آن برای تخمین توان لیبزچیتز^{۲۴}، که بزرگی آن برای تعیین گستردگی ترک استفاده می‌شود، را ارائه دادند [۱۹]. یان^{۲۵} و همکاران توانایی کشف عیوب در تیرهای لانه زنبوری را با استفاده از فرکانس طبیعی و پاسخ دینامیک ارزیابی نمودند. آنها دریافتند که طیف انرژی سیگنال تبدیل موجک^{۲۶} پاسخ دینامیک سازه، حساسیت بیشتری به وجود آسیب دارد [۲۰]. هان^{۲۷} و همکاران شاخص کشف عیوب را پیشنهاد دادند، که با نام شاخص نسبت بسته انرژی موجک^{۲۸} شناخته می‌شود. مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده نشان داد که این شاخص برای تشخیص ترک مشخص در سازه عملکرد مناسبی دارد [۲۱]. کیم^{۲۹} و همکاران روش ارزیابی ارتعاش محور ارائه دادند که از آنالیز موجک برای تعیین محل ترک استفاده می‌کرد [۲۲]. ژو و لا^{۳۰} روش جدیدی برای یافتن ترک در تیرهای سازه پل، تحت بار متحرک با استفاده از

مشخصات سیستم مبتنی بر موجک به دو گروه کلی تقسیم می‌شود. گروه اول مطالعاتی که در آنها از تبدیل موجک گسسته^۱ استفاده شده است و گروه دوم مطالعاتی که از تبدیل موجک پیوسته^۲ استفاده کرده‌اند [۳].

رابرتسون^۳ و همکاران از تبدیل موجک گسسته دابچیز^۴ برای استخراج توابع پاسخ ضربه‌ای از داده‌های ورودی و خروجی استفاده نمودند، سپس پارامترهای میرایی و حالت مودی سیستم با استفاده از الگوریتم فضای حالت^۵ استخراج نمودند [۴]. قانم و رومئو^۶ روش شناسایی موجک گالرکین^۷ گسسته را برای آنالیز وابسته به زمان سازه که به معادلات دیفرانسیلی مدل وابسته است، استفاده نمودند [۵].

هانگ^۸ و همکاران تبدیل موجک گسسته را به معادلات گسسته حرکت اعمال کردند و مشخصات مودال سازه حین زلزله و یا ناشی از ضعف سازه‌ای را استخراج کردند [۶]. تبدیل موجک گسسته برای شناسایی تغییر خطی و مستقل از زمان سیستم‌های غیرپارامتری توسط لوک و دمپیر^۹ ارائه شد [۷]. روش حالت-مکان موجک توسط ژو^{۱۰} و همکاران برای شناسایی پارامترهای دینامیکی در سیستم وابسته به زمان گسترش یافت [۸].

این روش در مقایسه با روش شناسایی خطی وابسته به زمان که توسط شن و لاو^{۱۱} ارائه شد، از محاسبه ضرایب ارتباطی ثانویه بی‌نیاز بود [۹]. در گروه دوم افرادی همچون استازوسکی^{۱۲} برای تشخیص فرکانس طبیعی و نسبت میرایی سیستم سازه‌ای از تبدیل موجک پیوسته استفاده کردند [۱۰]. لاردیز و گوتبروز^{۱۳} با استفاده از تابع موجک مورلت^{۱۴} وضوح بهتری را به نسبت روش استازوسکی ارائه کرد [۱۱]. علاوه بر تابع موجک مورلت، موجک چاوچی^{۱۵} برای غلبه بر محدودیت‌های شناسایی پارامترهای خطی وابسته به زمان توسط ارگول و لی^{۱۶} ارائه شد [۱۲].

- 1 Discrete wavelet transform (DWT)
- 2 Continuous wavelet transform (CWT)
- 3 Robertson
- 4 Daubechies (DB) wavelet transform
- 5 State-space algorithm
- 6 Ghanem and Romeo
- 7 Galerkin
- 8 Huang
- 9 Luk and Dampier
- 10 Xu
- 11 Shen and Law
- 12 Staszewski
- 13 Lardies and Gouttebroze
- 14 Morlet wavelet function
- 15 Cauchy wavelet
- 16 Argoul and Le

17 Slavič

18 Gabor wavelet function

19 Pandey

20 Sampaio

21 Gentile and Messina

22 Quek

23 Hong

24 Lipschitz exponent

25 Yan

26 Energy spectrum of wavelet transform

27 Han

28 Wavelet packet energy rate index

29 Kim

30 Zhu and Law

مودال) براساس یک تقارن مرکزی نسبت به مرکز صفحه با عضو متناظر خود جمع (یا از آن کم) می‌شود. در این حالت ماتریس مربعی که حاوی اطلاعات خیز آنالیز مودال می‌باشد، به ترکیبی از دو ماتریس بالا مثلثی تبدیل می‌شود که اثرات تکیه‌گاهی و نویزهای ناشی از حل عددی در آن کاملاً از بین رفته است. با اعمال تبدیل موجک گسسته به داده‌های جدید، محل آسیب با وضوح خیره‌کننده مشخص می‌شود.

در این پژوهش ابتدا الگوریتم تبدیل موجک گسسته ارائه می‌شود. سپس یک مثال عددی برای توضیح نحوه عملکرد این روش مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مدل عددی، فرکانس‌ها و چهار شکل آنالیز مودال یک صفحه مربعی که در چهار ضلع خود دارای تکیه‌گاه گیردار می‌باشد را شامل می‌شود. مدلسازی عددی این صفحه مربعی در نرم افزار انسیس^{۱۰} صورت پذیرفته است. بر خروجی آنالیز مودال صفحه، فیلتر بازسازی که کد نویسی آن در نرم افزار متلب انجام شده است، اعمال می‌شود. جهت بررسی کارایی و قدرت این روش اثر مکان‌های مختلف آسیب در صفحه و فاصله نقاط نمونه برداری متفاوت، نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده دقت و قدرت روش ارائه شده در این پژوهش جهت یافتن عیوب ریز در صفحات مربعی متقارن می‌باشد.

۲- تبدیل موجک گسسته

در این بخش خلاصه‌ای از تبدیل موجک گسسته استفاده شده در این پژوهش ارائه می‌شود. جهت دسترسی به اطلاعات جامع در این زمینه به مطالعات مالات^{۱۱} رجوع شود. تبدیل موجک گسسته از دسته‌ای مقیاس‌ها و انتقال‌های گسسته استفاده می‌کند که از قوانینی تعریف شده تبعیت می‌کنند. دقت در سطح z به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۱ و ۳]:

$$D_j(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} cD_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (1)$$

که $\psi_{j,k}$ تابع موجک و $cD_{j,k}$ ضرایب موجک در سطح z می‌باشد. تقریب در سطح z به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A_j(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} cA_j(k) \phi_{j,k}(t) \quad (2)$$

که $\phi_{j,k}$ تابع مقیاس و $cA_{j,k}$ ضریب مقیاس در سطح z می‌باشد. سیگنال $f(t)$ می‌تواند به صورت زیر ارائه شود:

$$f(t) = A_j + \sum_{j < l} D_j \quad (3)$$

برای تشخیص ویژگی‌های سیگنال‌ها، ممان‌های محوشونده نقش مهمی را ایفا می‌کند. موجک دارای n ممان محوشونده است، اگر شرط زیرارضا شود:

آنالیز موجک ارائه دادند. این روش به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی صحت‌سنجی شد. مکان ترک‌های چندگانه به صورت دقیق تعیین شد. نتایج به نویزهای سیستم سازه‌ای، سرعت و بزرگی بار متحرک حساس نبودند [۲۳]. ژانگ و ایادیجی^۱ روش جدیدی را برای تشخیص ترک‌های ریز در سازه‌های تیر مانند بدون استفاده از پارامترهای پایه‌ای مودال سازه ارائه دادند. این روش براساس تفاضل دو دسته از داده‌های آنالیز مودال، که مربوط به نیمه چپ و نیمه راست یک تیر دو سر ساده بود، بنا شده است. این روش قادر بود آسیب‌هایی با نسبت ترک ۵٪ را تشخیص دهد [۲۴].

اوانزوا و سوارس^۲ سازه‌های قاب مانند را جهت کشف عیوب با استفاده از تحلیل موجک مورد ارزیابی قرار دادند [۲۵]. چانگ و چن^۳ کشف عیوب در صفحات مستطیلی را مورد بررسی قرار دادند [۲۶]. دوکا^۴ و همکاران از تبدیل موجک متقارن ۴۵ برای تشخیص ترک در سازه‌های صفحه‌ای استفاده نمود [۲۷]. تابع موجک گاوسی دوبعدی^۵ برای تشخیص آسیب در صفحات تغییر شکل یافته توسط ژو^۶ و همکاران ارائه شد [۲۸]. فن و کیائو^۸ با استفاده از تابع موجک درگاوس^۹ دوبعدی به عیب‌یابی در صفحات سازه‌ای اقدام نمودند [۲۹].

هدف این پژوهش تشخیص و تعیین محل آسیب سازه‌ای در صفحات متقارن می‌باشد که نسبت آسیب در این صفحات برابر ۳٪ در نظر گرفته شده است. در مطالعاتی که پیش از این بر روی صفحات انجام شده است، کمترین نسبت آسیب که با آنالیز موجک به سختی قابلیت تشخیص داشته، ۵٪ بوده است و روش‌های موجود تنها قادر به تشخیص واضح عیوب با نسبت ترک ۲۰٪ یا بیشتر در صفحه بوده‌اند. ایده پیشنهادی که در این پژوهش برای کشف عیوب در صفحه ارائه شده است، تعمیم روش بازسازی داده‌های آنالیز مودال ژانگ و ایادیجی برای کشف آسیب در تیرها استخراج شده است [۲۴]. این روش با استفاده از بازسازی داده‌های آنالیز مودال صفحات مربعی متقارن نه تنها نویزهای را برطرف می‌کند، بلکه اثرات تکیه‌گاهی را که نتایج آنالیز موجک را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد، به طور کامل از بین می‌برد. لذا محل ترک با وضوح بسیار بالایی قابل تشخیص می‌شود. در این روش بازسازی داده‌های خیز آنالیز مودال (با توجه به متقارن یا پادمقارن نتایج آنالیز

1 Zhong and Oyadiji

2 Ovanesova and Suarez

3 Chang and Chen

4 Douka

5 four symmetrical wavelet transforms

6 two-dimensional directional Gaussian wavelet transform

7 Xu

8 Fan and Qiao

9 Dergauss2D

10 Ansys

11 Mallat

$$\phi(x, y) = \phi(x)\phi(y) \quad (۶)$$

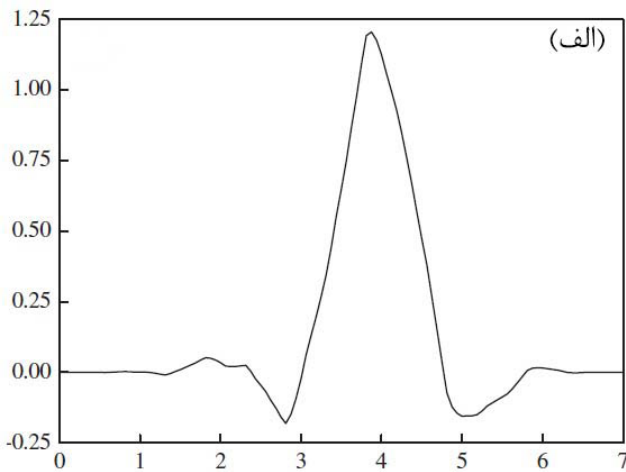
$$\psi^H(x, y) = \psi(x)\phi(y) \quad (۷)$$

$$\psi^V(x, y) = \phi(y)\psi(x) \quad (۸)$$

$$\psi^D(x, y) = \psi(x)\psi(y) \quad (۹)$$

که ψ^H متغیرها در راستای ستون را اندازه‌گیری می‌کند، ψ^V متغیرها را در راستای ردیف اندازه می‌گیرد و ψ^D متغیرها را در راستای قطر اندازه‌گیری می‌کند. موجک دوبعدی گسسته همچون موجک یک بعدی قادر به تشخیص آسیب‌های موجود در صفحه می‌باشد.

در پژوهش حاضر با توجه به توصیه‌های مراجع [۲۴ و ۲۷] از خانواده قدرتمند موجک سیملت^۱ با چهار ممان محوشونده جهت تحلیل سیگنال استفاده شده است. تابع موجک مادر و مقیاس موجک سیمیتریکال^۲ در شکل ۱ نمایش داده شده است.

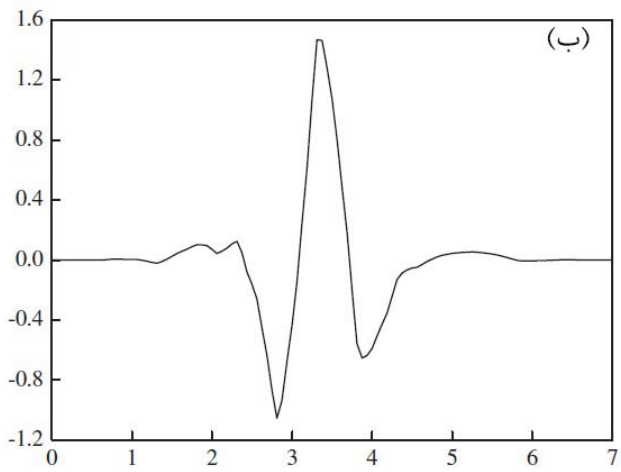


$$\int_{-\infty}^{+\infty} t^i \psi(t) dt = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (۴)$$

بنابراین n ممان محوشونده خطی عمودی برای چند جمله‌ای با درجه ۱-n وجود دارد. مالات اثبات کرد که برای موجک با n ممان محوشونده تابع به صورت زیر وجود دارد:

$$\psi(t) = \frac{d^n \theta(t)}{dt^n}, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \theta(t) dt \neq 0 \quad (۵)$$

تبدیل موجک یک بعدی به همه ابعاد قابل بسط می‌باشد. در دو بعد، یک تابع مقیاس دوبعدی، $\phi(x, y)$ و سه موجک دوبعدی $\psi^H(x, y)$ ، $\psi^V(x, y)$ و $\psi^D(x, y)$ مورد نیاز است که هر کدام مولفه‌ای از تابع مقیاس یک بعدی ϕ و موجک وابسته به آن ψ می‌باشند [۳۲]:



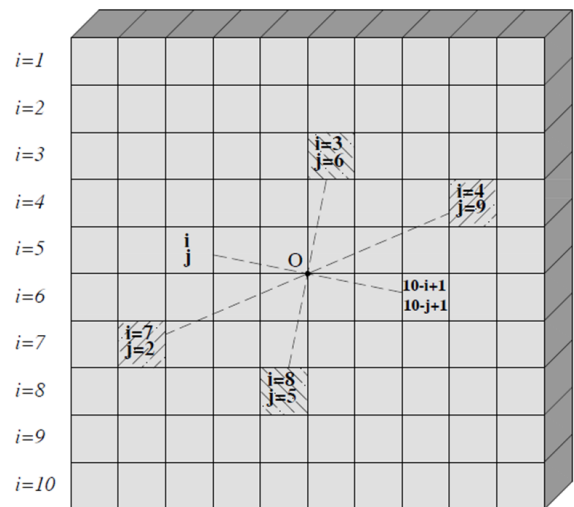
شکل ۱. موجک سیمیتریکال ۴، (الف) تابع مقیاس (ب) تابع موجک (موجک مادر)
Fig1. Symmetrical 4 wavelet: (a) scaling function and (b) wavelet function (mother wavelet)

۳- نحوه بازسازی داده‌های آنالیز مودال

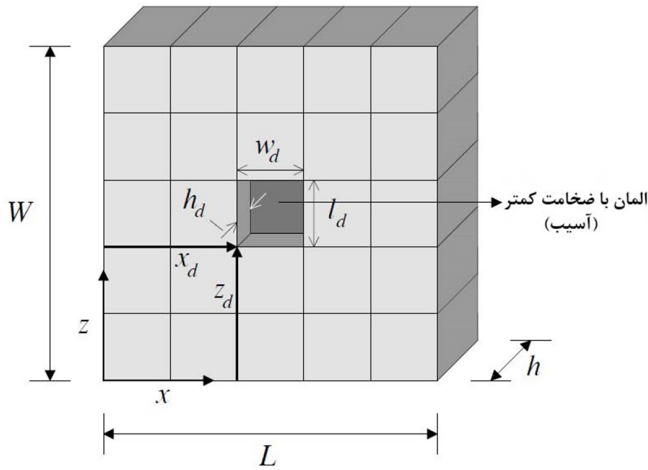
هدف روش ارائه شده در این پژوهش بزرگنمایی اثر آسیب‌های ریز و قابل تشخیص کردن آنها در گام اولیه می‌باشد. این روش با اعمال تبدیل موجک گسسته بر نتایج آنالیز مودال بازسازی شده صفحه آسیب دیده، عیوب را تشخیص می‌دهد. همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، ماتریس نتایج آنالیز مودال صفحه در برگیرنده $(i, j) \dots (n, n)$ گره محاسباتی می‌باشد، که n تعداد کل نقاط برداشت داده در هر راستای صفحه می‌باشد. با توجه به نتایج آنالیز مودال خیز صفحه در فرکانس‌های مختلف، آنچنان که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، سیگنال آنالیز مودال به دو دسته متقارن و پادمقارن تفکیک می‌شوند. حالت مودی اول و چهارم صفحه با توجه به مرکز

1 Symlet
2 Symmetrical 4

$j=1 \quad j=2 \quad j=3 \quad j=4 \quad j=5 \quad j=6 \quad j=7 \quad j=8 \quad j=9 \quad j=10$



شکل ۲. نحوه بازسازی ماتریس نتایج آنالیز مودال خیز صفحه
Fig2. Reconstruction of plate deflection modal analysis



شکل ۳. نمای اجزا محدود صفحه آسیب دیده
Fig 3. finite element view of damaged plate

در شکل ۳، L طول صفحه، W عرض صفحه، h ضخامت صفحه، l_d طول آسیب، w_d عرض آسیب، h_d ضخامت آسیب، x_d و z_d مختصات محل آسیب در صفحه می باشد. ابعاد هندسی و مشخصات مواد صفحه آسیب دیده به صورت کامل در جدول ۱ شرح داده شده است. آسیب ها در نقاط ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۸۰۰ میلیمتری از انتهای سمت چپ صفحه در راستای x و در کلیه حالت ها در فاصله ۳۰۰ میلیمتری از انتهای پایین صفحه در راستای z واقع شده اند. فاصله نقاط نمونه برداری در صفحه مدلسازی شده l_s ، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میلیمتر انتخاب شده است. برای مثال در حالتی که l_s برابر ۱۰ میلیمتر در نظر گرفته می شود، خیز صفحه منتج از آنالیز مودال هر ۱۰ میلیمتر هم در طول و هم در عرض صفحه برداشت می شود که برای ۱۰۱ نقطه در هر راستا داده استخراج می شود (ماتریس 101×101).

در این پژوهش اشکال مودی صفحه مربعی آسیب دیده در شکل ۴ نمایش داده شده است. برای بدست آوردن فرکانس ها و اشکال مودی صفحه گیردار، مدل اجزا محدود در نرم افزار انسیس ۲ استفاده شده است. مدل اجزا محدود از نظر عملی بر سایر روش های تحلیلی برتری دارد، گرچه استفاده از مدل اجزا محدود نویزها و خطاهایی در پاسخ دینامیکی ایجاد می کند. به عبارت دیگر مدلسازی جز به جز، مواد یکپارچه منجر به ایجاد نویزهایی می شود، که مشکل جدی را به وجود نمی آورد. در حالی که در شرایط فیزیکی و واقعی نویزها از منابع مختلف در سیگنال ایجاد می شوند و وقوع آنها در سیگنال اجتناب ناپذیر است. مدلسازی به صورت یک صفحه با اتصال گیردار در هر چهار وجه انجام شده است و محل آسیب به صورت قسمتی با ضخامت کمتر مدلسازی

تقارن صفحه (نقطه O) متقارن هستند و لیکن حالت مودی دوم و سوم پادمتقارن محسوب می شوند. برای حالت های متقارن در مود اول و چهارم مقادیر هر نقطه مانند (i, j) از نقطه متناظر آن $(i, j+1)$ ، که دارای تقارن مرکزی نسبت به آن است، کسر می گردد و این مقدار جدید در نقطه (i, j) جایگزین می شود. از طرف دیگر، برای حالت پادمتقارن در مود دوم و سوم مقادیر هر نقطه (i, j) با مقادیر نقطه ای که در مختصات پادمتقارن نسبت به مرکز صفحه واقع شده است، $(i, j+1)$ ، $(i, j-1)$ جمع می گردد و این مقدار جدید در نقطه (i, j) جایگزین می شود. نتایج این فرآیند برای هر چهار مود صفحه آسیب دیده، به صورت یک ماتریس متقارن نسبت مرکز صفحه ارائه می شود، که به عنوان سیگنال ورودی آنالیز موجک مورد استفاده قرار می گیرد. تبدیل موجک گسسته بر سیگنال آنالیز مودال بازسازی شده صفحه اعمال می شود و ضرایب موجک استخراج می شود. سپس نتایج آنالیز موجک سیگنال ورودی در راستای (CH) ، x و در راستای (CV) ، y محل آسیب را در یک نقطه خاص نمایش می دهند. این دو مقدار پس از نویززدایی ۵۰٪ به جهت کاهش اثر نویزها با هم جمع می شوند تا محل آسیب با وضوح بیشتری مشاهده شود.

در مواردی که میزان آسیب کوچک می باشد، اعمال تبدیل موجک گسسته بر نتایج آنالیز مودال پایه ای، اطلاعاتی از آسیب را نمایش می دهد. هرچند که به دلیل کوچک بودن آسیب، انحراف ضرایب موجک ناشی از آسیب، زیاد قابل توجه نیست. در نهایت تبدیل موجک گسسته سیگنال آنالیز مودال بازسازی شده اعمال می شود که تشخیص آسیب در این روش بسیار واضحتر می باشد. لازم به ذکر است که روش ارائه شده تنها برای صفحات متقارن که در چهار راستا دارای شرایط تکیه گاهی مشابه هستند، عملی می باشد.

۴-مدلسازی عددی

سازه منتخب برای ارائه مدلسازی عددی در برگزیده یک صفحه مربعی الاستیک با ابعاد $L \times W \times h$ ، که در چهار لبه دارای تکیه گاه گیردار ساده همراه با المانی با ضخامت کم به عنوان آسیب در شکل ۳ نمایش داده شده است. ناحیه آسیب دیده به صورت المانی با سختی کمتر (ضخامت کمتر) در نقطه ای با مختصات x_d و z_d مشخص شده است. نسبت آسیب $r_d = h_d/h$ در کلیه مدل ها ثابت و برابر ۳٪ در نظر گرفته شده است. در رابطه نسبت آسیب h_d ضخامت آسیب و h ضخامت صفحه می باشد.

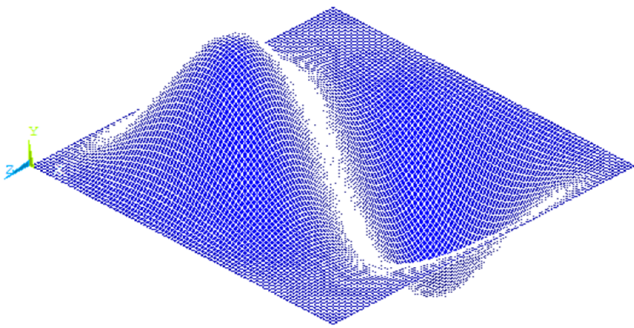
دلیل قدرت بالای محیط نرم افزار متلب جهت برنامه نویسی و جعبه افزار قدرت آنالیز موجک تعبیه شده در این نرم افزار جهت آنالیز موجک صفحه آسیب دیده، از این نرم افزار استفاده شد.

شده است. نتایج آنالیز مودال در نرم افزار انسیس در قالب یک ماتریس دوبعدی که دربرگیرنده خیز صفحه ناشی از آنالیز مودال می باشد به عنوان ورودی در نرم افزار متلب به کارگرفته شد. در این پژوهش به

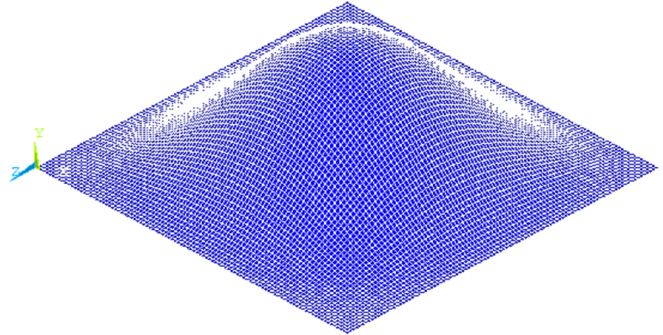
جدول ۱. مشخصات هندسی و مواد بکار گرفته شده در مدلسازی صفحه آسیب دیده

Table. 1. Geometrical properties and materials used in modeling the damaged plate

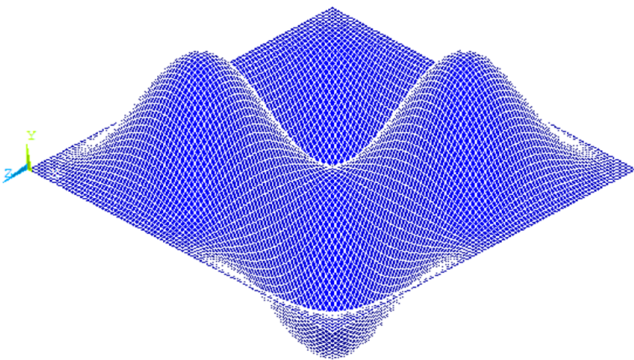
L	$=$	1000 mm	h_d	$=$	0.3 mm	r_d	$=$	3%	E	$=$	200 Gpa
W	$=$	1000 mm	l_d	$=$	40 mm	x_d	$=$	variable	ρ	$=$	7860 kg/m ³
h	$=$	10 mm	w_d	$=$	40 mm	z_d	$=$	variable	ν	$=$	0.3



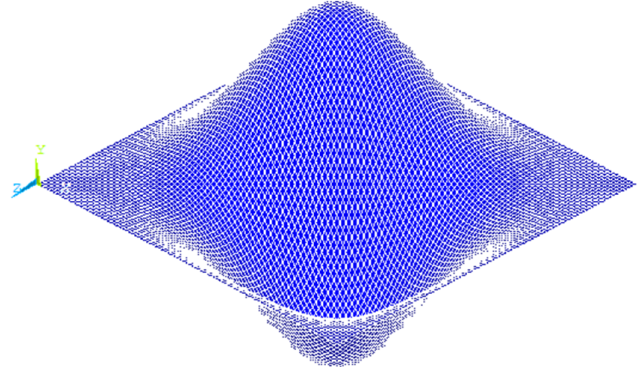
ب: مود دو، فرکانس: ۱/۷۶۷۲ هرتز
(b) second mode



الف: مود یک، فرکانس: ۰/۸۵۶۲ هرتز
(a) First mode



د: مود چهار، فرکانس: ۲/۶۰۵۴ هرتز
(d) fourth mode



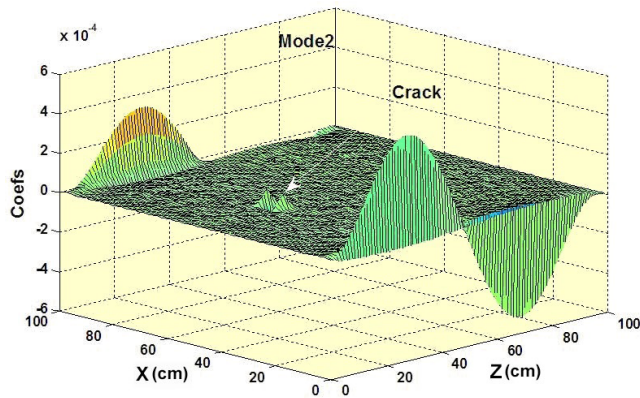
ج: مود سه، فرکانس: ۱/۷۶۷۲ هرتز
(c) third mode

شکل ۴. چهار حالت مودی صفحه آسیب دیده، الف) مود یک، ب) مود دوم، ج) مود سوم، د) مود چهارم

Fig 4. Four modal analysis modes of damaged plate

$$l \times w \times h = 1000 \times 1000 \times 10 \text{ mm}, (x_d, z_d) = (500, 300), r_d = 3\%.$$

و با فاصله نقاط نمونه برداری ۱۰ میلیمتر را نمایش می‌دهد. شکل ۵ الف و ب ضرایب موجک در مود اول و دوم را نمایش می‌دهد. در این دو شکل محل آسیب به‌سختی مشاهده می‌شود و لیکن با توجه به ضرایب ناچیز موجک محل آسیب محسوس نیست. به‌خصوص در مود سوم و چهارم ناپیوستگی بسیار ناچیزی را در ناحیه آسیب دیده نمایش می‌دهد، که برای تشخیص محل آسیب شواهد لازم را ارائه نمی‌دهد.

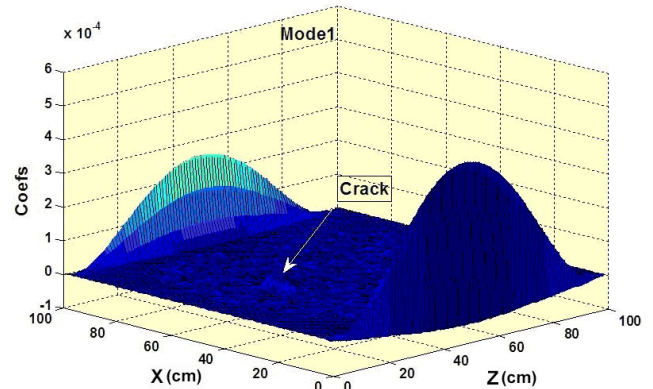


ب : ضرایب موجک آنالیز مودال پایه مود دو

(b) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (second mode)

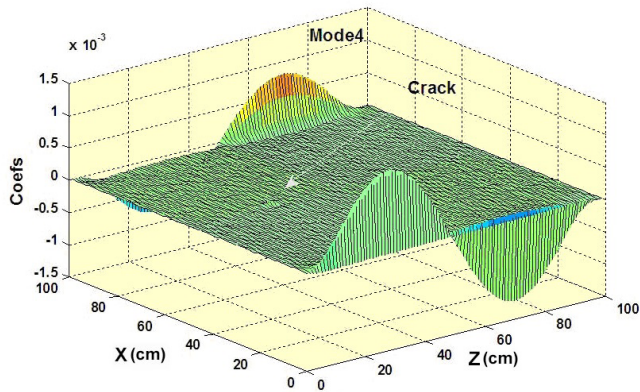
۴-۱- مقایسه تبدیل موجک گسسته و تبدیل موجک گسسته بازسازی شده

در این بخش روش ارائه شده در پژوهش حاضر با روش تبدیل موجک آنالیز مودال پایه مورد قیاس قرار گرفته است. شکل ۵ چنین سه بعدی ضرایب موجک حالت اصلی مود اول، دوم، سوم و چهارم صفحه آسیب دیده با آسیب در مختصات $(x_d, z_d) = (500, 300)$



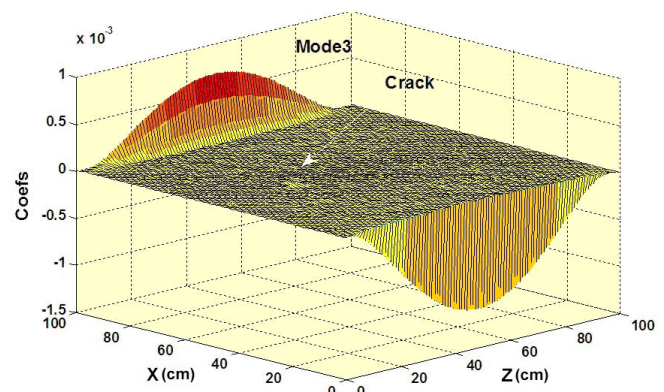
الف : ضرایب موجک آنالیز مودال پایه مود یک

(a) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (first mode)



د : ضرایب موجک آنالیز مودال پایه مود چهارم

(d) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (fourth mode)



ج : ضرایب موجک آنالیز مودال پایه مود سه

(c) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (third mode)

شکل ۵. نتایج اعمال تبدیل موجک گسسته بر آنالیز مودال پایه صفحه آسیب دیده در چهار مود
Fig 5. wavelet coefficients of modal analysis of damaged plate in four modes

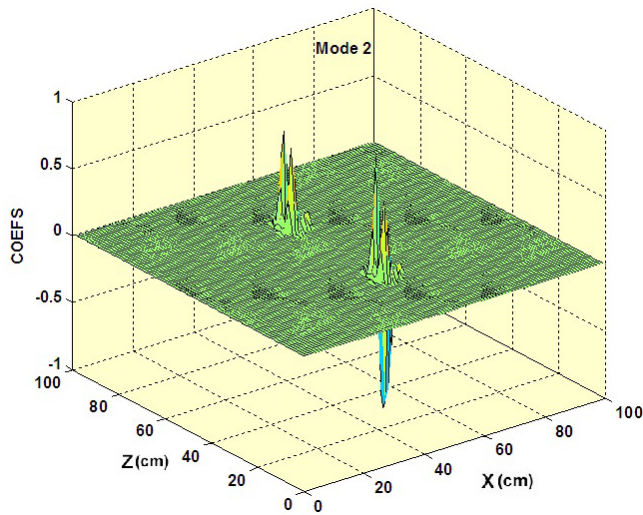
$$, r_d = 3\%, l_s = 10mm, (n \times n) = (101 \times 101) (x_d, z_d) = (500, 300)$$

از بین رفته است. نویزهای ایجاد شده ناشی از استقرار محل آسیب و حل عددی موجب شده که اثر آسیب در شکل ۶ مود سوم به راحتی قابل مشاهده نباشد. آسیب یک پدیده موضعی می‌باشد. الگوریتم ارائه شده برای بازسازی آنالیز مودال، مستلزم تبدیل شدن ماتریس مربعی آنالیز مودال به یک ماتریس بالا مثلثی و جایگزین شده این ماتریس بالا مثلثی در ماتریس مربعی اولیه می‌باشد، لذا جز خواص یا

شکل ۶ ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده برای چهار مود را نشان می‌دهد. با توجه به محل آسیب کلیه مودها در شکل ۶ (به جز مود سه) پیک بزرگی را در محدوده آسیب نمایش می‌دهند و ضرایب موجک به نسبت حالت قبل از وضوح و کیفیت بالایی برخوردارند. شوکی که اثرات تکیه‌گاهی در ضرایب موجک در حالت مودی پایه ایجاد می‌کنند، به‌صورت کامل در حالت آنالیز مودال بازسازی شده

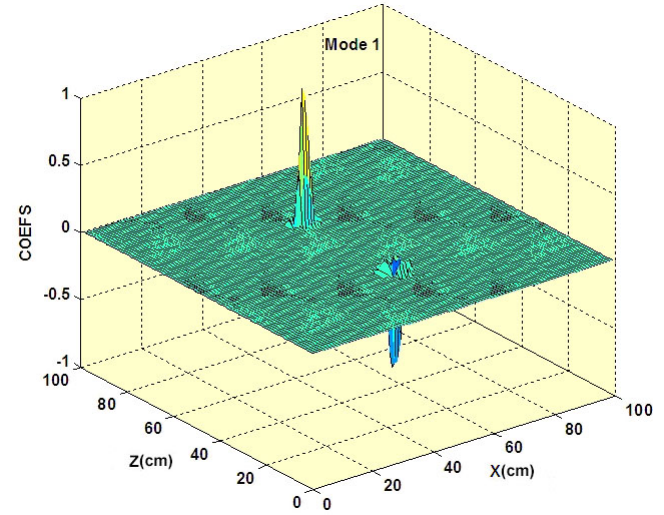
قابل مشاهده باشد (مود یک و دو). نتیجه‌گیری اصلی که از شکل ۵ و بدست می‌آید، حاکی از برتری کامل روش آنالیز مودال بازسازی شده در قیاس با روش آنالیز مودال پایه جهت کشف آسیب در صفحه می‌باشد. به عبارت دیگر حذف اثرات تکیه‌گاهی، کاهش نویزهای ناشی از حل عددی و نمایش محل آسیب در حالت‌های مودی با فرکانس پایین از جمله دستاوردهایی روش ارائه شده می‌باشد، که تشخیص آسیب‌های ریز با نسبت آسیب ۳٪ را در صفحات فراهم می‌آورد.

محدودیت‌های این روش نمایش محل آسیب در دو نقطه می‌باشد، که یکی محل اصلی آسیب و دیگری نقطه تقارن مرکزی محل آسیب می‌باشد (شکل ۶-الف و ب). پاسخ‌های موضعی توسط فرکانس‌های بالای مودی استخراج می‌شوند. فرکانس‌های پایین پاسخ‌های کلی سازه را استخراج می‌کنند و حساسیت کمتری نسبت تغییرات موضعی دارند [۳۳]. همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود بکارگیری روش آنالیز مودال بازسازی شده موجب می‌شود محل آسیب علاوه بر فرکانس‌های بالا (مود چهار) در فرکانس‌های پایین هم به وضوح



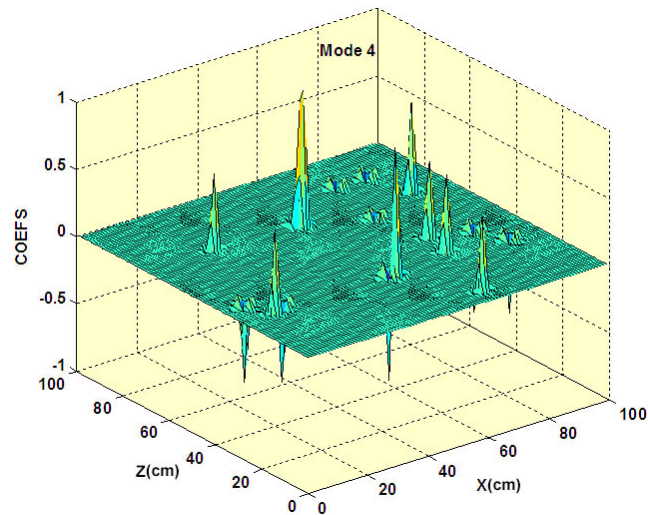
ب : ضرایب موجک آنالیز مودال پایه مود دو

(b) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (second mode)



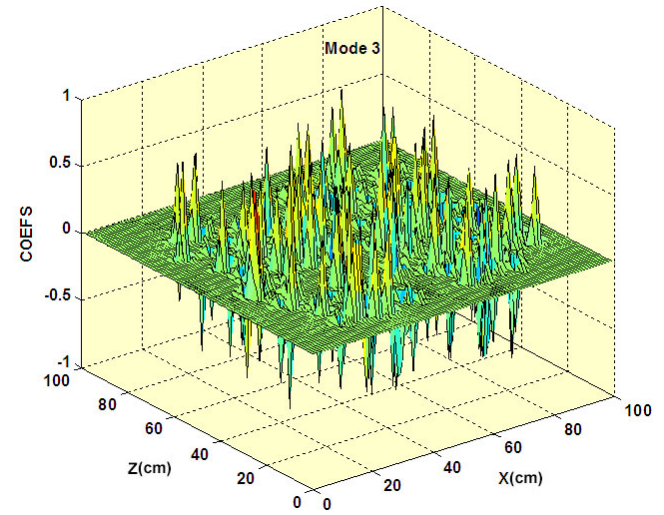
الف : ضرایب موجک آنالیز مودال پایه مود یک

(a) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (first mode)



د : ضرایب موجک آنالیز مودال پایه مود چهار

(d) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (fourth mode)



ج : ضرایب موجک آنالیز مودال پایه مود سه

(c) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (third mode)

شکل ۶. نتایج اعمال تبدیل موجک گسسته بر آنالیز مودال پایه صفحه آسیب دیده در چهار مود
Fig 6. wavelet coefficients of reconstructed modal analysis of damaged plate in four modes

$$, r_d = 3\% , l_s = 10mm , (n \times n) = (101 \times 101) (x_d, z_d) = (500, 300)$$

۵- پیشبرد صحت روش ارائه شده در کشف عیوب

به جهت تایید کارایی و عملی بودن روش ارائه شده موارد متنوعی از آسیب در مکان‌های مختلف با فاصله نمونه برداری متنوع چنانکه در جدول ۲ نمایش داده شده، مورد مطالعه قرار گرفت. در این بخش به مطالعه اثر مکان آسیب و فاصله نقاط نمونه برداری پرداخته خواهد شد.

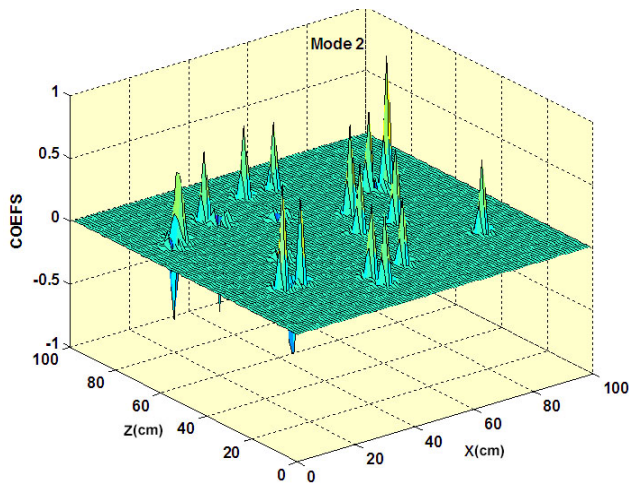
۵-۱- اثر موقعیت آسیب

شکل ۷ چینش سه بعدی ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود اول، دوم، سوم و چهارم صفحه آسیب دیده را نمایش می‌دهد. آسیب در مختصات $(x_d, z_d) = (200, 300)$ واقع می‌باشد و فاصله نقاط نمونه برداری ۱۰ میلی‌متر است. همانگونه که مشاهده می‌شود در شکل ۷ (ج) مود سوم و چهارم که دارای فرکانس بالا هستند، محل آسیب به صورت

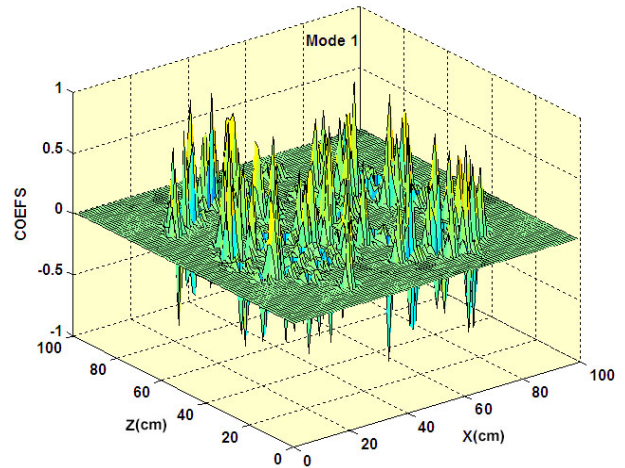
جدول ۲. (x_d, z_d) محل آسیب، l_s فاصله نقاط نمونه برداری و n تعداد نقاط نمونه برداری در هر راستا

Table 2. (x_d, z_d) damage location, l_s sampling point distance and n , number of sampling points in each direction

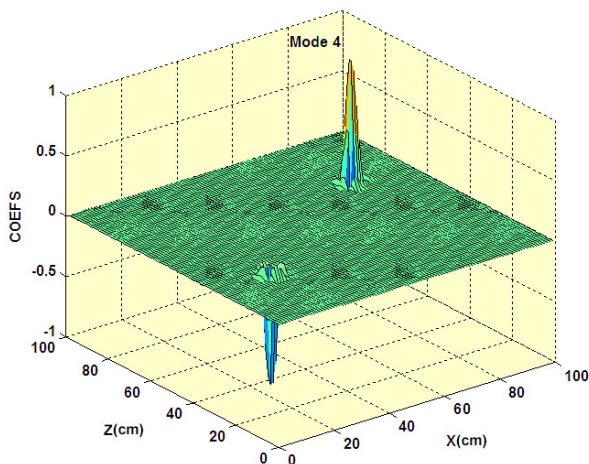
(x_d, z_d)	l_s	$n \times n$
(200, 300)	۱۰ mm	101 × 101
(300, 300)	۲۰ mm	51 × 51
(500, 300)	۴۰ mm	26 × 26
(800, 300)	-----	-----



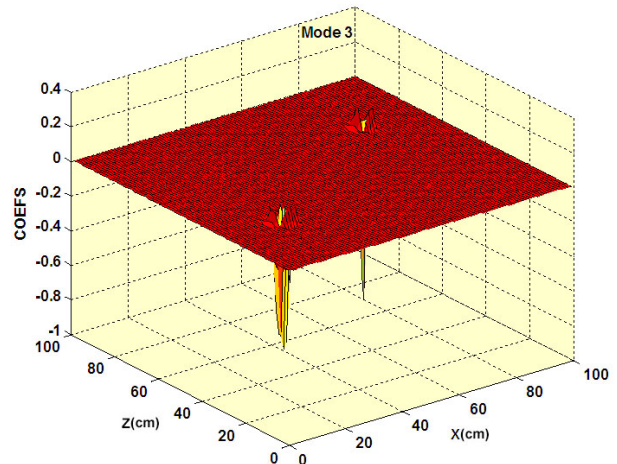
ب : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود دو
(b) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (second mode)



الف : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود یک
(a) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (first mode)



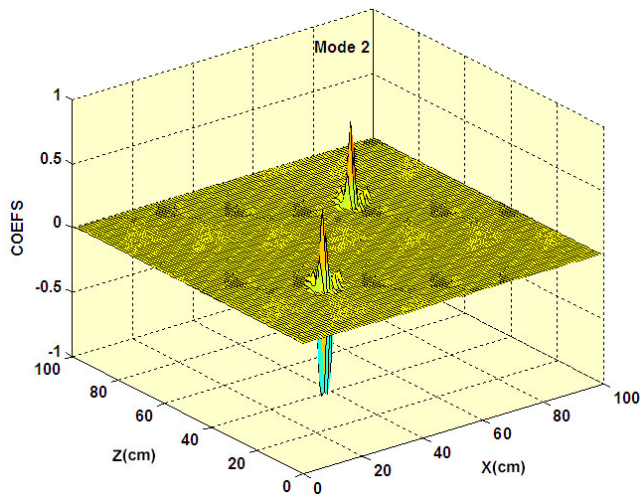
د : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود چهارم
(d) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (fourth mode)



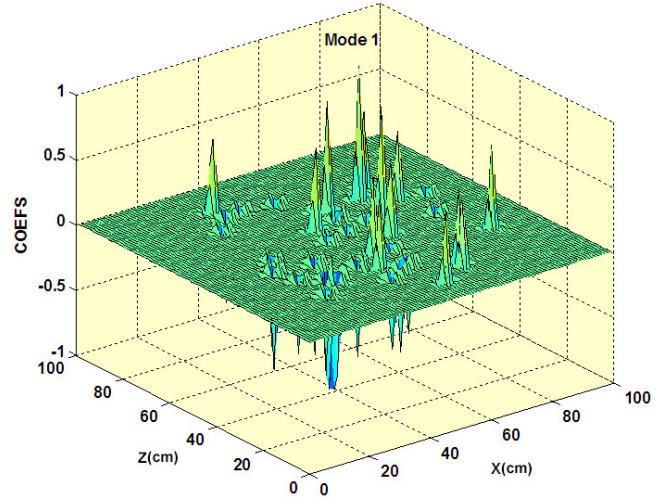
ج : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود سه
(c) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (third mode)

شکل ۷. نتایج اعمال تبدیل موجک گسسته بر آنالیز مودال پایه صفحه آسیب دیده در چهار مود
Fig 7. wavelet coefficients of reconstructed modal analysis of damaged plate in four modes

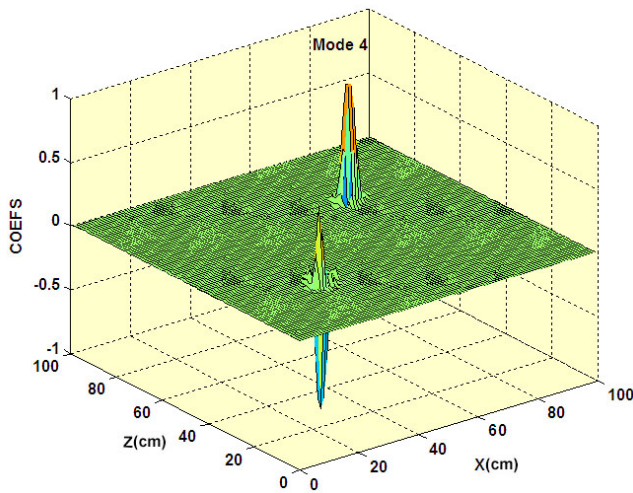
$$, r_d = 3\%, l_s = 10\text{mm}, (n \times n) = (101 \times 101) (x_d, z_d) = (200, 300)$$



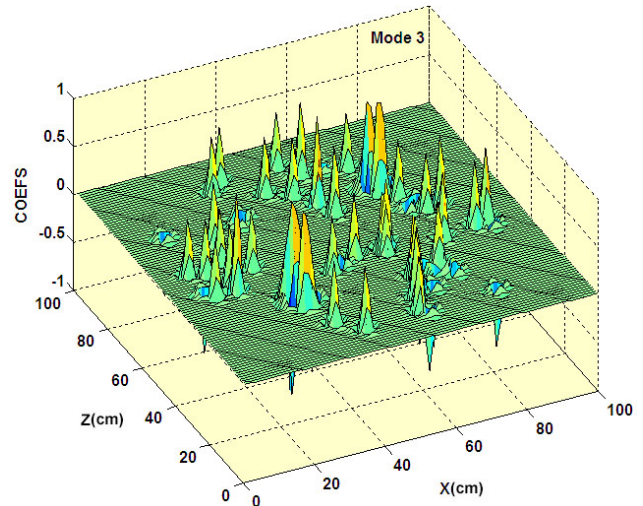
ب : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود دو
(b) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (second mode)



الف : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود یک
(a) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (first mode)



د : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود چهار
(d) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (fourth mode)



ج : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود سه
(c) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (third mode)

شکل ۸. نتایج اعمال تبدیل موجک گسسته بر آنالیز مودال بازسازی شده صفحه آسیب دیده در چهار مود
Fig 8. wavelet coefficients of reconstructed modal analysis of damaged plate in four modes

$$(x_d, z_d) = (300, 300), r_d = 3\%, l_s = 10mm, (n \times n) = (101 \times 101)$$

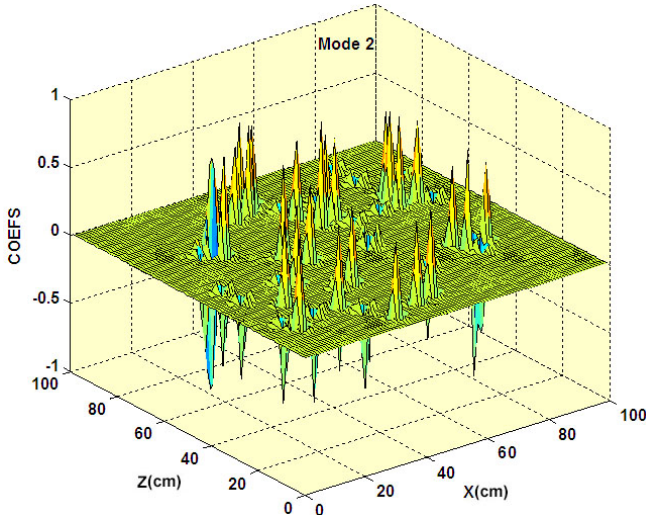
دوم و چهارم با قدرت بالایی مشخص شده است. در مود سوم نیز علیرغم وجود نویز محل آسیب از خودنمایی لازم جهت کشف آسیب برخوردار است. در مود یک پیک محل آسیب منفی می باشد و لیکن همچون بقیه مودها به دلیل اغتشاشات زیاد از قدرت تشخیص بالایی برخوردار نیست. حال سوال این است دلیل نویزها و اغتشاشات موجود در شکل های ۶-ج، ۷-الف و ۸-الف چیست؟ پاسخ به این سوال مستلزم شناخت صحیح از اشکال مودی صفحه آسیب دیده (شکل ۴) می باشد. شکل مود اول دارای یک قله در مرکز می باشد. مود دوم و سوم دارای یک قله و یک فرو افتادگی به موازات قطر صفحه می باشند.

کامل و با وضوح بالا تشخیص داده شده است. در شکل ۷ مود دوم علیرغم وجود نویزها همچنان محل آسیب قابل تشخیص است لیکن در مود اول اغتشاشات ناشی از نویزها تشخیص آسیب را دشوار نموده است.

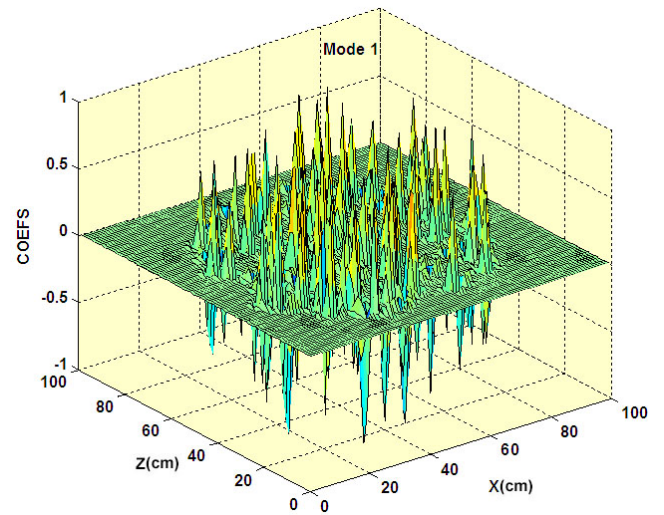
در شکل ۷ مود سوم ضرایب موجک ناشی از محل آسیب مقدار منفی را به خود اختصاص داده اند ولی همچنان از نظر مقدار، پیک ناشی از کشف آسیب را به وضوح نمایش می دهند. شکل ۸ چپین سه بعدی ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود اول، دوم، سوم و چهارم صفحه آسیب دیده با مختصات آسیب $(x_d, z_d) = (300, 300)$ را نمایش می دهد. محل آسیب در مود

مقایسه بین شکل های ۷-الف و ۸-الف این موضوع را به خوبی تبیین می کند. هر دو این اشکال حالت مودی یک را دارند. آسیب با حرکت از مختصات $(x_d, z_d) = (200, 300)$ در شکل ۷ الف به مختصات $(x_d, z_d) = (300, 300)$ در شکل ۸-الف به مرکز صفحه و قله جابجایی مودال مود یک نزدیکتر می شود و خیز محل آسیب افزایش

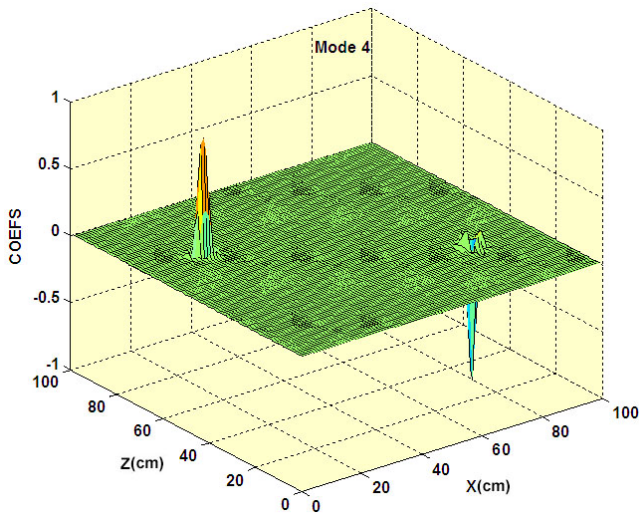
مود چهارم دارای دو قله و دو فرورفتگی در چهار ناحیه صفحه می باشد. قرار گرفتن آسیب در نزدیکی هر کدام از این پیک های ناشی از آنالیز مودال موجب کشف دقیق عیوب می شود. به عبارت دیگر اگر آسیب در نزدیکی نقاطی که جابجایی مودال صفحه نزدیک به صفر باشد، نویزها و اغتشاشات شدیدی در نتایج آنالیز موجک مشاهده خواهد شد [۲۴].



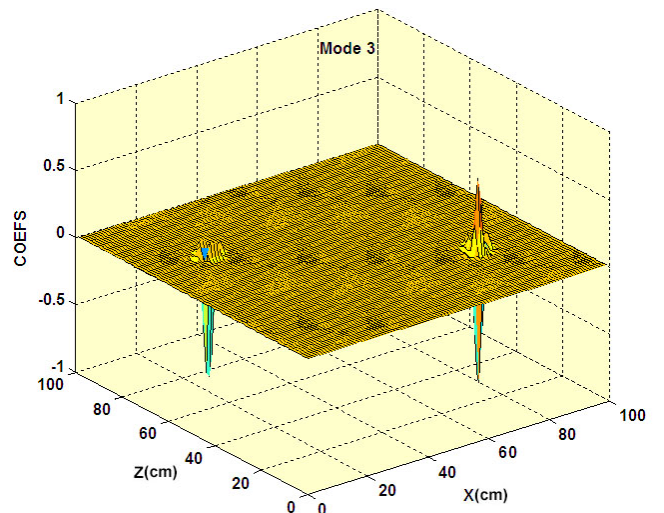
ب : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود دو
(b) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (second mode)



الف : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود یک
(a) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (first mode)



د : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود چهار
(d) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (fourth mode)



ج : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود سه
(c) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (third mode)

شکل ۹. نتایج اعمال تبدیل موجک گسسته بر آنالیز مودال بازسازی شده صفحه آسیب دیده در چهار مود
Fig 9. wavelet coefficients of reconstructed modal analysis of damaged plate in four modes

$$(x_d, z_d) = (800, 300), r_d = 3\%, l_s = 10\text{mm}, (n \times n) = (101 \times 101)$$

همچنین همانگونه که بیان شد، در شکل ۶-الف نیز نزدیک شدن بیشتر محل آسیب به پیک خیز آنالیز مودال مود یک، باعث وضوح و دقت بالا در کشف محل آسیب شده است.

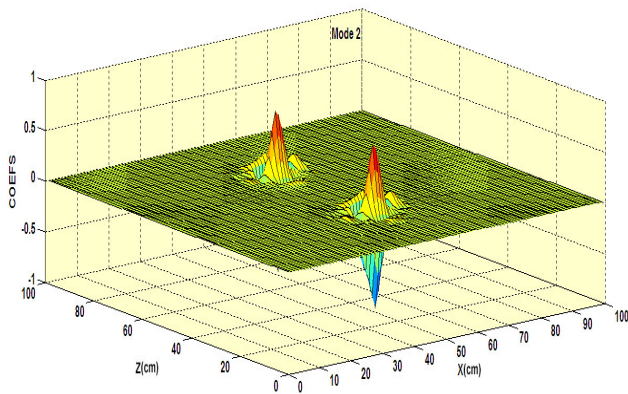
پیدا می کند، که این امر سبب کاهش اغتشاشات در شکل ۸-الف به نسبت شکل ۷-الف شده است.

(فرکانس‌های بالا) از سایر مدهای ارتعاشی سازه بیشتراست. موقعیت آسیب و شکل جابجایی آنالیز مودال صفحه در چهار مود ارتعاشی، نقش بسیار تعیین کننده‌ای در ایجاد و از بین رفتن نویزها در نتایج آنالیز مودک دارد. همچنین نتایج، حاکی از دقت و کارایی بالای روش ارائه شده در کشف عیوب می باشد.

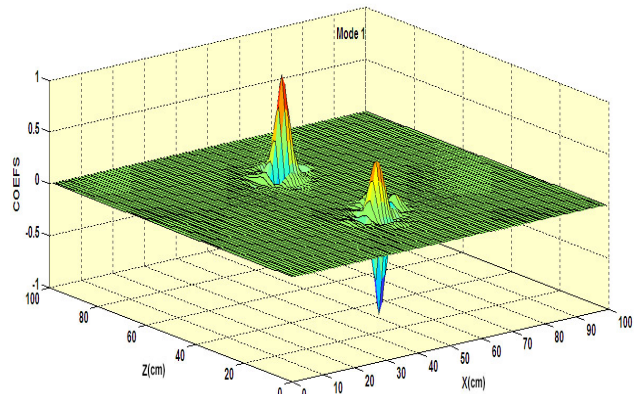
۳-۵- اثر فاصله نقاط نمونه برداری

نتایج ارائه شده در بخش قبل براساس فاصله ده میلیمتری نقاط نمونه برداری ارائه شد. تعداد نقاط داده، زمانی که فاصله نقاط

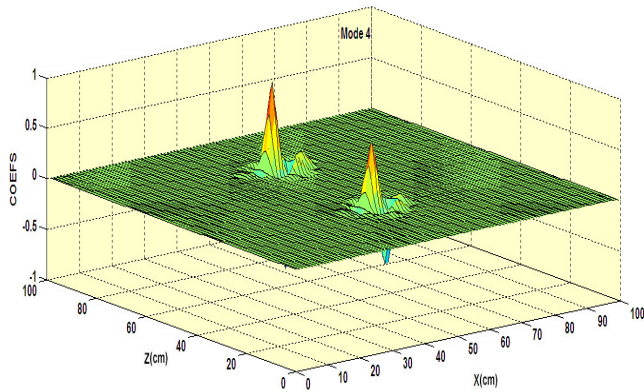
شکل ۹ چینش سه بعدی ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده هر چهار مود صفحه آسیب دیده با مختصات آسیب $(x_d, z_d) = (800, 300)$ را نمایش می دهد. محل آسیب در مود سوم و چهارم با قدرت بالایی مشخص شده است. در شکل ۹ مود اول و دوم به دلیل اغتشاشات تشخیص محل آسیب را دشوار نموده است. مقایسه بین شکل ۹ و شکل ۷، حاکی از شباهت نحوه رفتار محل آسیب در این دو شکل می باشد که در واقع قرارگیری محل آسیب به صورت قرینه در این دو شکل عامل این شباهت هستند. بررسی اثر آسیب در نقاط مختلف نشان می دهد که قابلیت تشخیص آسیب در مود چهارم



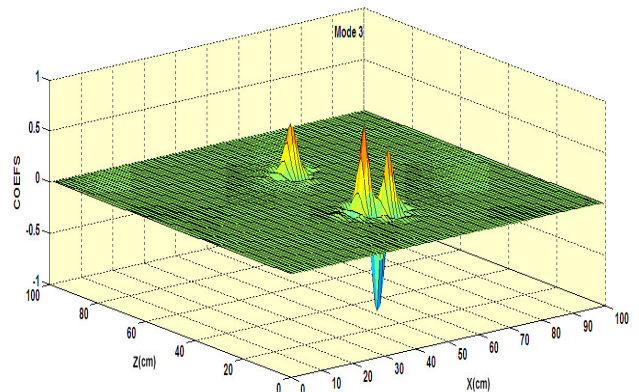
ب : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود دو
(b) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (second mode)



الف : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود یک
(a) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (first mode)



د : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود چهارم
(d) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (fourth mode)



ج : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود سه
(c) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (third mode)

شکل ۱۰. نتایج اعمال تبدیل موجک گسسته بر آنالیز مودال بازسازی شده صفحه آسیب دیده در چهار مود
Fig10. wavelet coefficients of reconstructed modal analysis of damaged plate in four modes

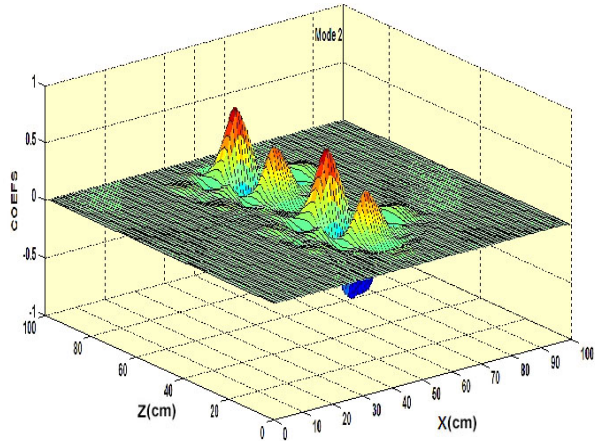
$$(x_d, z_d) = (500, 300), r_d = 3\%, l_s = 20mm, (n \times n) = (51 \times 51)$$

در شکل ۱۰ چینش سه بعدی ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده برای آسیب در مختصات $(x_d, z_d) = (500, 300)$ با فاصله نقاط نمونه برداری ۲۰ میلیمتر ارائه شده است. نتایج به

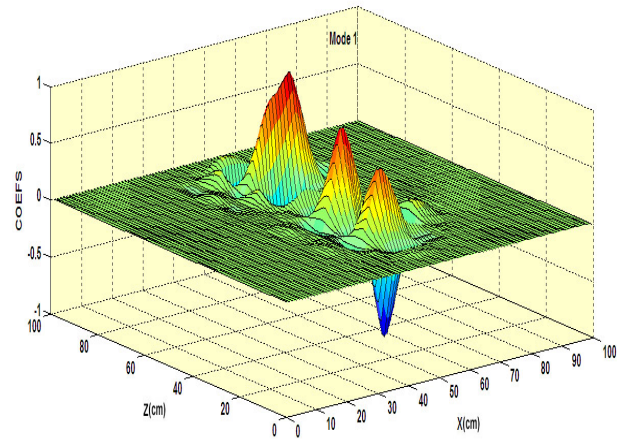
نمونه برداری ۲۰ میلیمتر باشد، با توجه به ابعاد صفحه مورد بررسی، ۵۱، نقطه می باشد. به صورت مشابه در صورتی که فاصله نقاط نمونه برداری ۴۰ میلیمتر باشد تعداد نقاط نمونه برداری ۲۶ نقطه می شود.

حاکمی از این است که با افزایش فاصله نقاط نمونه برداری، دقت در تعیین محل آسیب کاهش یافته است. در حالی که کلیه نمودارها همچنان اطلاعات قابل قبولی از وجود آسیب را ارائه می دهند. نکته

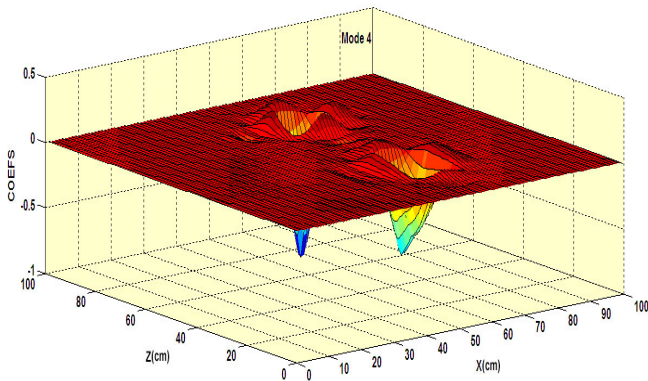
وضوح استقرار آسیب در مکان مورد نظر را نشان می دهند. در شکل ۱۱ ضرایب موجک برای همان آسیب با فاصله نقاط نمونه برداری ۴۰ میلی متر در چهار مود ارتعاشی، ارائه شده است. تفسیر نمودارها



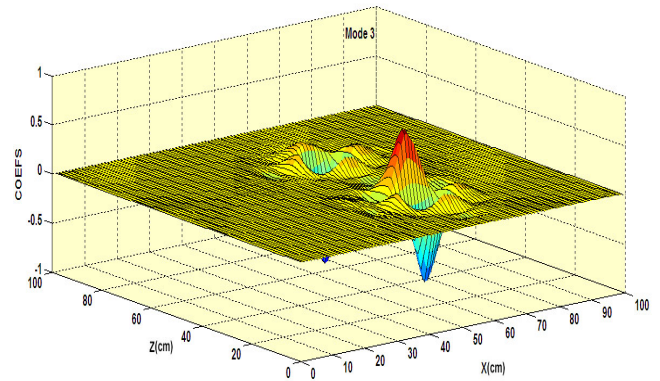
ب : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود دو
(b) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (second mode)



الف : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود یک
(a) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (first mode)



د : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود چهار
(d) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (fourth mode)



ج : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود سه
(c) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis (third mode)

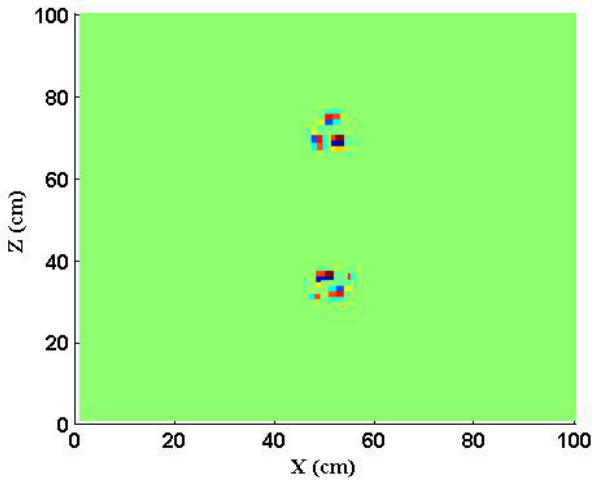
شکل ۱۱. نتایج اعمال تبدیل موجک گسسته بر آنالیز مودال بازسازی شده صفحه آسیب دیده در چهار مود
Fig. 11. wavelet coefficients of reconstructed modal analysis of damaged plate in four modes

$$(x_d, z_d) = (500, 300), r_d = 3\%, l_s = 40mm, (n \times n) = (26 \times 26)$$

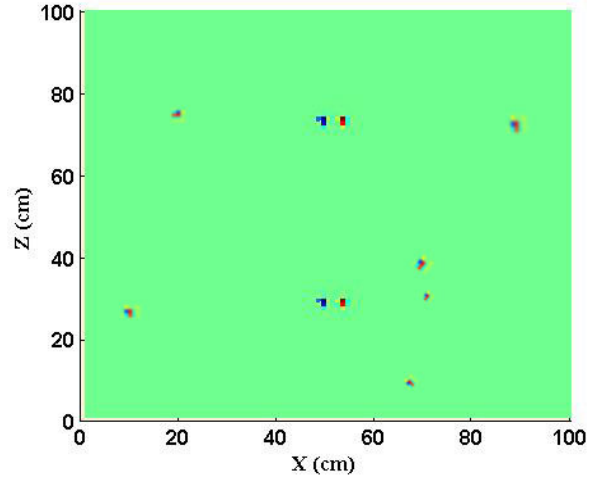
اثرگذار است. جهت امکان مقایسه وضوح تعیین محل آسیب براساس فاصله نقاط نمونه برداری در شکل ۱۲، نتایج تعیین محل آسیب در مود چهارم شکل های ۶، ۱۰ و ۱۱ مورد مقایسه قرار گرفته است. با افزایش فاصله نقاط نمونه برداری وضوح در تعیین محل آسیب کاهش یافته است و بزرگی جهش سیگنال آنالیز موجک افزایش یافته است.

قابل تامل این است که با افزایش فاصله نقاط نمونه برداری اثر نویزها و اغتشاشات، که در شکل ۶-ج کاملاً مشهود می باشند در ۱۰-ج و ۱۱-ج به صورت کامل از بین رفته است.

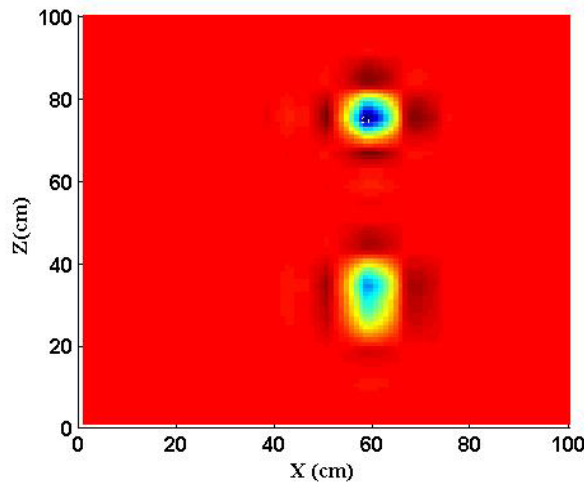
همانگونه که از نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ و ۱۱ مشهود است فاصله نقاط نمونه برداری به صورت مستقیم بر وضوح تعیین محل آسیب



ب : فاصله نقاط نمونه برداری برابر با ۲۰ میلیمتر
 (b) Interpolation with a step length of 20 mm
 $(n \times n) = (51 \times 51) \quad l_s = 20mm$



الف : فاصله نقاط نمونه برداری برابر با ۱۰ میلیمتر
 (a) Interpolation with a step length of 10 mm
 $l_s = 10mm \quad (n \times n) = (101 \times 101)$



ج : فاصله نقاط نمونه برداری برابر با ۴۰ میلیمتر
 (c) Interpolation with a step length of 40 mm
 $(n \times n) = (51 \times 51) \quad l_s = 20mm$

شکل ۱۲. اثر کاهش تعداد نقاط نمونه برداری در وضوح تعیین محل آسیب با استفاده از تبدیل موجک گسسته بر آنالیز مودال بازسازی شده صفحه آسیب دیده

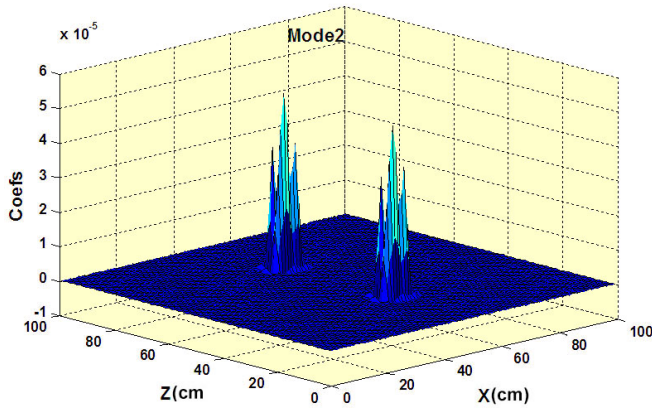
Fig12. Effect of reducing sample point on the determination of the location of the damage with using wavelet coefficients of reconstructed modal analysis

$$(x_d, z_d) = (500, 300), r_d = 3\%$$

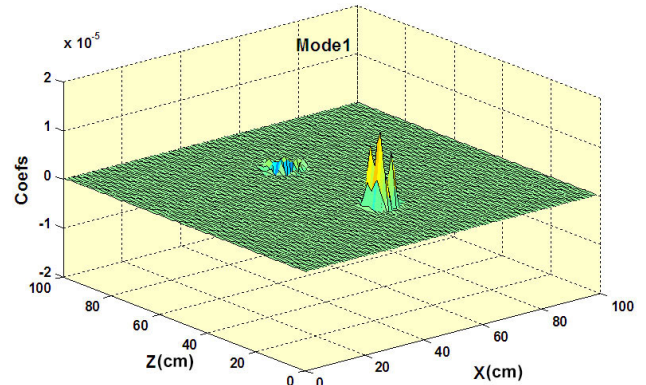
۴-۵- استفاده از درونیابی برای کاربردهای عملی

یکی از محدودیت‌ها در بحث پایش سازه تعداد حسگرهای استفاده شده در سیستم می‌باشد. این امر منجر به استفاده از فاصله نقاط نمونه برداری بزرگ می‌شود. گرچه دقت در تعیین محل آسیب با افزایش فاصله نقاط نمونه برداری کاهش می‌یابد. حال برای افزایش دقت

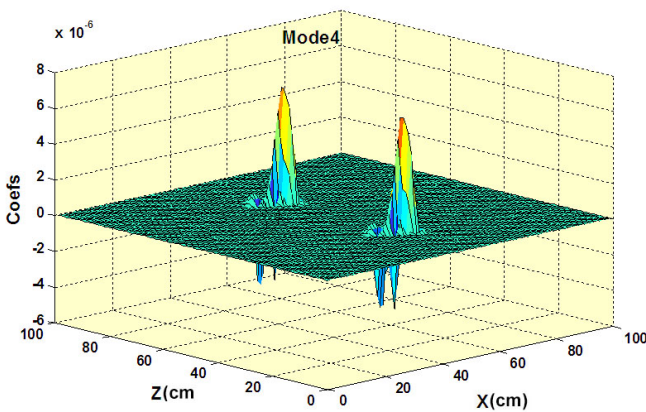
واقع دلیل از بین رفتن اغتشاشات در شکل ۱۲-الف نیز همین افزایش در بزرگی جهش آنالیز موجک می‌باشد، که منجر به ناچیز شدن اثر اغتشاشات در شکل ۱۲-ب و ۱۲-ج شده است.



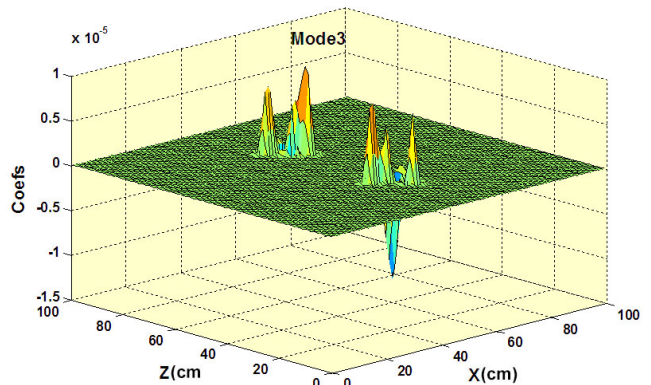
ب : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود دو با درونیابی
(b) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis with interpolation (second mode)



الف : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود یک با درونیابی
(a) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis with interpolation (first mode)



د : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود چهار با درونیابی
(d) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis with interpolation (third mode)



ج : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود سه با درونیابی
(c) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis with interpolation (first mode)

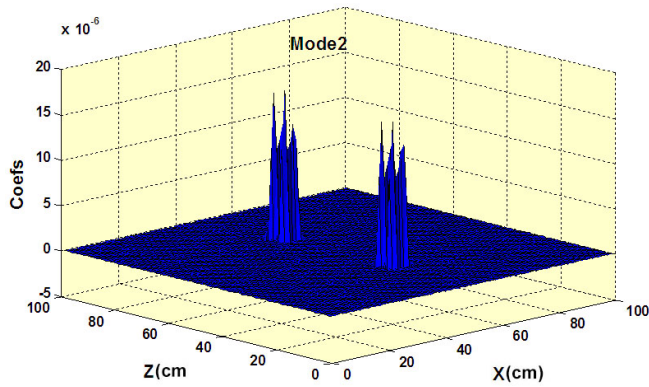
شکل ۱۳. نتایج اعمال تبدیل موجک گسسته بر آنالیز مودال بازسازی شده صفحه آسیب دیده با درونیابی در چهار مود
Fig. 13. wavelet coefficients of reconstructed modal analysis of damaged plate with interpolation in four modes

$$(x_d, z_d) = (500, 300), r_d = 3\%, l_s = 10\text{mm}, (n \times n) = (101 \times 101)$$

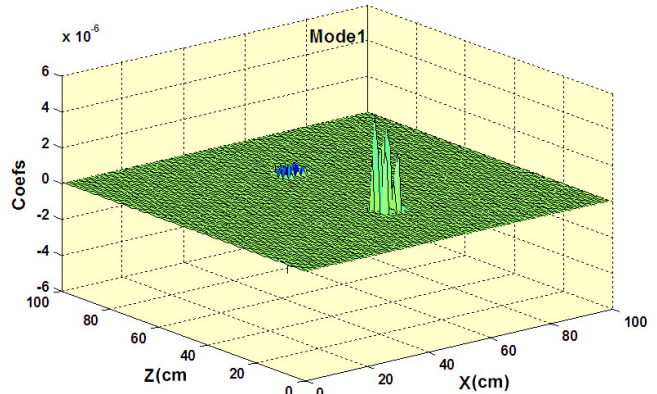
درونیابی شده پیاده شده است. نهایتاً نمودارهای شکل ۱۳ نتیجه اعمال تبدیل موجک گسسته بر آنالیز مودال بازسازی و درونیابی شده شکل ۱۱ می‌باشد. در شکل ۱۴ مجدداً همین روند درونیابی با طول گام ۲٫۵ میلی‌متر بر داده‌های آنالیز مودال شکل ۱۱ اعمال شده است. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهد، استفاده از درونیابی داده‌های آنالیز مودال تاثیر فوق العاده‌ای بر وضوح دقت کشف محل عیوب در صفحه از خود نشان داده است. مقایسه نتایج شکل‌های ۱۴ و ۶ نشان می‌دهد در استفاده‌های کاربردی این روش لزوماً استفاده

تعیین محل آسیب از درونیابی دوبعدی برای اشکال خیزمندی پیش از اعمال آنالیز موجک استفاده شده است. پیشتر دوکا و همکاران و ژانگ و ایادیجی در مطالعات خود از روش درونیابی استفاده نمودند [۲۴ و ۲۷]. در شکل ۱۳ درونیابی دوبعدی با طول گام ۱۰ میلی‌متر بر داده‌های آنالیز مودال آسیب موجود در شکل ۱۱ که دارای ۲۶ نقطه نمونه برداری در هر راستا می‌باشد، اعمال شده است.

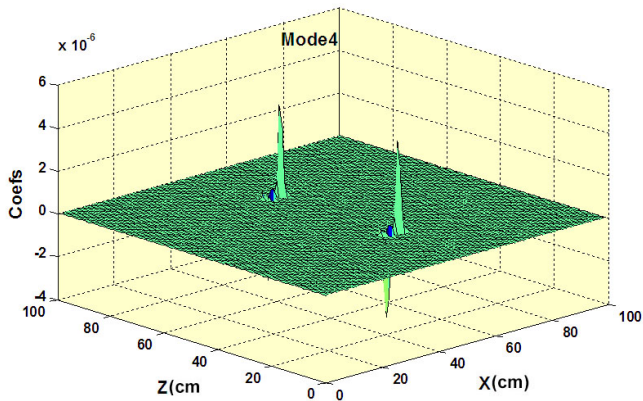
درونیابی به داده‌های هر چهار مود ارتعاشی شکل ۱۱ اعمال شده است، سپس الگوریتم بازسازی آنالیز مودال بر روی این داده‌های



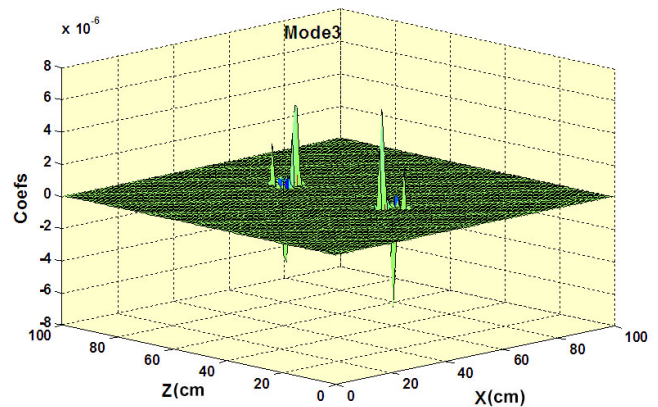
ب : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود دو با درونیابی
(b) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis with interpolation
(second mode)



الف : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود یک با درونیابی
(a) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis with interpolation
(fourth mode)



د : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود چهار با درونیابی
(c) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis with interpolation
(third mode)



ج : ضرایب موجک آنالیز مودال بازسازی شده مود سه با درونیابی
(d) wavelet coefficients of reconstructed modal analysis with interpolation
(fourth mode)

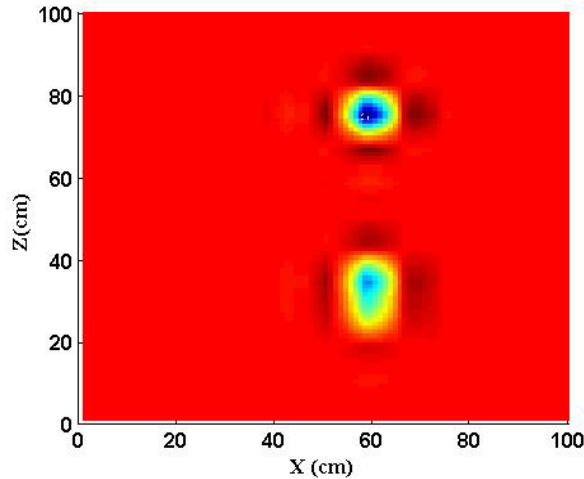
شکل ۱۴. نتایج اعمال تبدیل موجک گسسته بر آنالیز مودال بازسازی شده صفحه آسیب دیده با درونیابی در چهار مودار مود
Fig14. wavelet coefficients of reconstructed modal analysis of damaged plate with interpolation in four modes

$$(x_d, z_d) = (500, 300), r_d = 3\%, l_s = 10\text{mm}, (n \times n) = (101 \times 101)$$

می باشد. در شکل ۱۵-ب و ۱۵-ج پیک ناشی از عبور موجک در ابتدا و انتهای آسیب روی داده است و چون استفاده از درونیابی تعداد نقاط داده ها را افزایش داده است، اثر پیک موجک در آستانه نزدیک شدن به آسیب بر نقاط پیرامونی آسیب کاهش یافته لذا با افزایش تعداد نقاط نمونه برداری وضوح نتایج افزایش یافته است. لیکن در شکل ۱۵-الف با توجه به اینکه ابعاد آسیب 40×40 میلیمتر است و فاصله نقاط نمونه برداری هم همین مقدار است، موجک حین عبور از آسیب از یک نقطه به نقطه دیگر در دو سوی آسیب از خود پاسخ نشان می دهد و نقاط اطراف آسیب نیز متاثر از این پاسخ سیگنالی شده اند، لذا دقت در تعیین محل آسیب در این حالت کاهش یافته است.

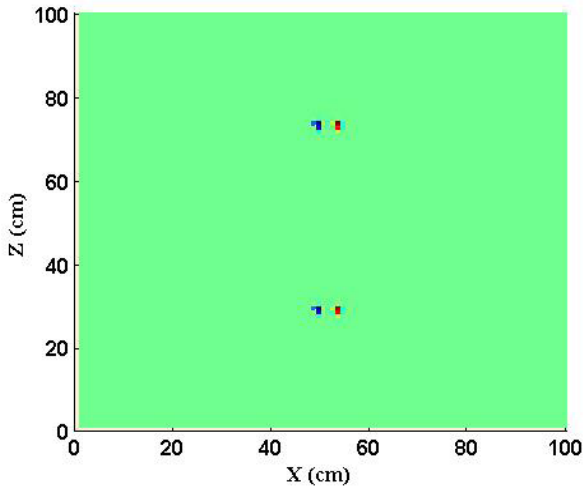
بیشتر از حسگرها نه تنها سودمند نیست بلکه موجب ایجاد اغتشاش در نتایج آنالیز موجک (چنانکه در شکل ۶ مشاهده می شود) می گردد. به عبارت دیگر استفاده از درونیابی نه تنها با استفاده کمتر از حسگرها صرفه اقتصادی ایجاد می کند، بلکه با کاهش اغتشاشات و نویزها موجب بهبود نتایج آنالیز موجک مودال بازسازی شده، می گردد.

جهت ایجاد امکان مقایسه وضوح تعیین محل آسیب با استفاده از درونیابی در شکل ۱۵ نتایج تعیین محل آسیب در مود چهارم شکل های ۶، ۱۳ و ۱۴ مورد مقایسه قرار گرفته است. با کاهش طول گام نمونه برداری وضوح در تعیین محل آسیب افزایش یافته است. نکته قابل توجه در شکل ۱۶ رابطه ابعاد آسیب و طول گام درونیابی

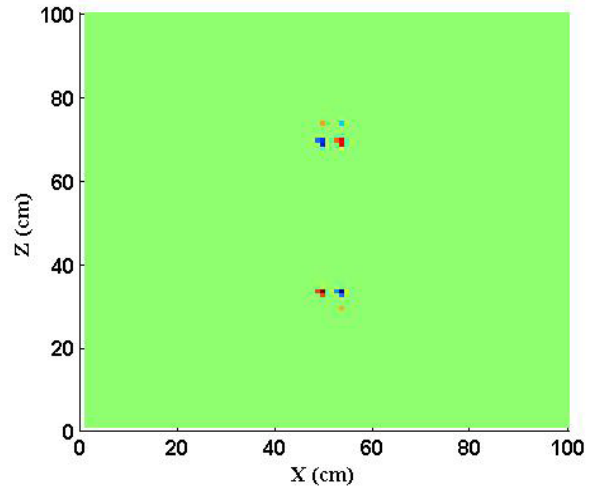


الف : فاصله نقاط نمونه برداری برابر با ۴۰ میلیمتر
(a) Interpolation with a step length of 40 mm

$$(n \times n) = (51 \times 51) l_s = 20mm$$



ج : اعمال درون یابی با طول گام برابر با ۲٫۵ میلیمتر
(c) Interpolation with a step length of 2.5 mm



ب: اعمال درون یابی با طول گام برابر با ۱۰ میلیمتر
(b) Interpolation with a step length of 10 mm

شکل ۱۵. اثر طول گام درونیابی در وضوح تعیین محل آسیب با استفاده از تبدیل موجک گسسته بر آنالیز مودال بازسازی شده صفحه آسیب دیده

Fig15. Effect of the interpolation step length on the determination of the location of the damage

$$(x_d, z_d) = (500, 300), r_d = 3\%$$

وفاصله نمونه برداری متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج، کارایی روش ارائه شده را در کشف عیوب به وضوح نشان می دهد و در واقع ابزاری قدرتمند جهت شناسایی آسیب به نسبت روش تبدیل موجک برنتایج آنالیز مودال اصلی را ارائه می دهد. علیرغم حساسیت بیشتر و کارایی فرکانس های بالا (مود چهار) روش ارائه شده قابلیت بالایی در کشف آسیب در فرکانس های پایین از خود به نمایش گذاشت. در واقع محل آسیب و نزدیک بودن این محل به پیک جابجایی آنالیز مودال عامل اصلی

۶- نتیجه گیری

این پژوهش روشی ساده ولی دقیق براساس اعمال تبدیل موجک بر نتایج آنالیز مودال بازسازی شده برای تشخیص آسیب کوچک در سازه های همچون صفحات مربعی متقارن ارائه می دهد که نسبت آسیب در آنها برابر ۳٪ می باشد.

پاسخ مودال صفحه با تکیه گاه گیردار، براساس روش اجزا محدود در نرم افزار انسیس مدل سازی و اندازه گیری شده است. نقاط مختلف آسیب

لازم به ذکر است استفاده از این روش براساس تبدیل موجک گسسته نیازمند تخمین دقیق اشکال مودی می باشد که این امر مشکلاتی را به جهت استفاده در سازه های واقعی ایجاد می کند. در واقع اشکال اصلی این روش که گستردگی استفاده از آن را کاهش می دهد، استفاده از آنالیز مودال می باشد. گرچه با استفاده از روش های سریع و نوین جدید همچون اسکن لیزری لرزه ای، این محدودیت، مشکل اساسی را ایجاد نمی کند [۳۴].

عملکرد موفقیت آمیز روش ارائه شده می باشد. به علاوه جهت بهبود دقت در کشف عیوب از درون یابی بر داده های اندازه گیری شده آنالیز مودال هر چهار مود، استفاده شد. نتایج حاکی از تاثیر شگفت انگیز درون یابی بر نتایج آنالیز مودال، در کشف بهتر عیوب موجود در صفحه می باشد. از سوی دیگر استفاده درون یابی به نوعی با کاهش تعداد حسگرهای موجود در سیستم پایش سبب کاهش هزینه های گزاف سیستم های پایش نیز می شود.

۷- فهرست علائم

محل فهرست علائم قبل از مراجع است. ابتدا علائم انگلیسی به ترتیب الفبا و سپس علائم یونانی به ترتیب الفبا تایپ شود.

l	طول صفحه	l_d	طول آسیب صفحه	w_d	عرض آسیب صفحه	l_s	فاصله نقاط نمونه برداری	CV	خروجی پیمایش عمودی موجک
w <th>عرض صفحه</th> <td>E <td>مدول یانگ مواد</td> <td>x_d <td>محل آسیب در راستای x صفحه</td> <td>ψ <td>تابع موجک مادر</td> <td>cA <td>ضریب مقیاس موجک</td> </td></td></td></td>	عرض صفحه	E <td>مدول یانگ مواد</td> <td>x_d <td>محل آسیب در راستای x صفحه</td> <td>ψ <td>تابع موجک مادر</td> <td>cA <td>ضریب مقیاس موجک</td> </td></td></td>	مدول یانگ مواد	x_d <td>محل آسیب در راستای x صفحه</td> <td>ψ <td>تابع موجک مادر</td> <td>cA <td>ضریب مقیاس موجک</td> </td></td>	محل آسیب در راستای x صفحه	ψ <td>تابع موجک مادر</td> <td>cA <td>ضریب مقیاس موجک</td> </td>	تابع موجک مادر	cA <td>ضریب مقیاس موجک</td>	ضریب مقیاس موجک
h <th>ضخامت صفحه</th> <td>ρ <td>چگالی مواد</td> <td>z_d <td>محل آسیب در راستای z صفحه</td> <td>ϕ <td>تابع مقیاس آنالیز موجک</td> <td>cD <td>ضریب مقیاس مادر</td> </td></td></td></td>	ضخامت صفحه	ρ <td>چگالی مواد</td> <td>z_d <td>محل آسیب در راستای z صفحه</td> <td>ϕ <td>تابع مقیاس آنالیز موجک</td> <td>cD <td>ضریب مقیاس مادر</td> </td></td></td>	چگالی مواد	z_d <td>محل آسیب در راستای z صفحه</td> <td>ϕ <td>تابع مقیاس آنالیز موجک</td> <td>cD <td>ضریب مقیاس مادر</td> </td></td>	محل آسیب در راستای z صفحه	ϕ <td>تابع مقیاس آنالیز موجک</td> <td>cD <td>ضریب مقیاس مادر</td> </td>	تابع مقیاس آنالیز موجک	cD <td>ضریب مقیاس مادر</td>	ضریب مقیاس مادر
h_d <th>ضخامت آسیب در صفحه</th> <td>ν <td>ضریب پواسون</td> <td>r_d <td>نسبت آسیب</td> <td>CH <td>خروجی پیمایش افقی موجک</td> <td></td> <td></td> </td></td></td>	ضخامت آسیب در صفحه	ν <td>ضریب پواسون</td> <td>r_d <td>نسبت آسیب</td> <td>CH <td>خروجی پیمایش افقی موجک</td> <td></td> <td></td> </td></td>	ضریب پواسون	r_d <td>نسبت آسیب</td> <td>CH <td>خروجی پیمایش افقی موجک</td> <td></td> <td></td> </td>	نسبت آسیب	CH <td>خروجی پیمایش افقی موجک</td> <td></td> <td></td>	خروجی پیمایش افقی موجک		

system identification by discrete wavelet transforms, Digital Signal Processing, 16(3) (2006) 303-319.

[9] X. Xu, Z. Shi, Q. You, Identification of linear time-varying systems using a wavelet-based state-space method, Mechanical Systems and Signal Processing, 26 (2012) 91-103.

[10] Z.S.L. Shen, S. Law, Parameter identification of LTV dynamical system based on wavelet method, In Proceedings of the Forth International Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, October (2006), pp. 202-210.

[11] W. Staszewski, Identification of non-linear systems using multi-scale ridges and skeletons of the wavelet transform, Journal of Sound and Vibration, 214(4) (1998) 639-658.

[12] J. Lardies, S. Gouttebroze, Identification of modal parameters using the wavelet transform, International Journal of Mechanical Sciences, 44(11) (2002) 2263-2283.

[13] P. Argoul, T.-p. Le, Instantaneous indicators of structural behaviour based on the continuous Cauchy wavelet analysis, Mechanical Systems and Signal Processing, 17(1) (2003) 243-250.

[14] J. Slavič, I. Simonovski, M. Boltežar, Damping identification using a continuous wavelet transform: application to real data, Journal of Sound and Vibration, 262(2) (2003) 291-307.

[15] A. Pandey, M. Biswas, M. Samman, Damage detection from changes in curvature mode shapes, Journal of sound and vibration, 145(2) (1991) 321-332.

[16] S. Ravanfar, H. Razak, Z. Ismail, H. Monajemi, An improved method of parameter identification and damage detection in beam structures under flexural vibration using wavelet multi-

مراجع

[1] A. Behnia, H. Chai, M. Yorikawa, S. Momoki, M. Terazawa, T. Shiotani, Integrated non-destructive assessment of concrete structures under flexure by acoustic emission and travel time tomography, Construction and Building Materials, 67 (2014) 202-215.

[2] H. Pahlavan, A. Naseri, A. Einollahi, Probabilistic Seismic Vulnerability assessment of RC Frame Structures Retrofitted with Steel Jacketing, Amirkabir Journal of Civil Engineering, (2018). (in Persian)

[3] D.J. Joo, Damage detection and system identification using a wavelet energy based approach, Columbia University, 2012.

[4] M. Ruzzene, A. Fasana, L. Garibaldi, B. Piombo, Natural frequencies and dampings identification using wavelet transform: application to real data, Mechanical systems and signal processing, 11(2) (1997) 207-218.

[5] A. Robertson, K. Park, K. Alvin, Identification of structural dynamics models using wavelet-generated impulse response data, Journal of vibration and acoustics, 120(1) (1998) 261-266.

[6] R. Ghanem, F. Romeo, A wavelet-based approach for the identification of linear time-varying dynamical systems, Journal of sound and vibration, 234(4) (2000) 555-576.

[7] C. Huang, S. Hung, C. Lin, W. Su, A wavelet-based approach to identifying structural modal parameters from seismic response and free vibration data, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 20(6) (2005) 408-423.

[8] R.-P. Luk, R.I. Damper, Non-parametric linear time-invariant

- modal data, *Computers & Structures*, 89(1-2) (2011) 127-148.
- [26] A. Ovanesova, L.E. Suarez, Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures, *Engineering Structures*, 26(1) (2004) 39-49.
- [27] C.-C. Chang, L.-W. Chen, Detection of the location and size of cracks in the multiple cracked beam by spatial wavelet based approach, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(1) (2005) 139-155.
- [28] E. Douka, S. Loutridis, A. Trochidis, Crack identification in plates using wavelet analysis, *Journal of sound and vibration*, 270(1-2) (2004) 279-295.
- [29] W. Xu, M. Radziński, W. Ośtachowicz, M. Cao, Damage detection in plates using two-dimensional directional Gaussian wavelets and laser scanned operating deflection shapes, *Structural Health Monitoring*, 12(5-6) (2013) 457-468.
- [30] W. Fan, P. Qiao, A 2-D continuous wavelet transform of mode shape data for damage detection of plate structures, *International Journal of Solids and Structures*, 46(25-26) (2009) 4379-4395.
- [31] A. Bagheri, G. Ghodrati Amiri, M. Khorasani, H. Bakhshi, Structural damage identification of plates based on modal data using 2D discrete wavelet transform, *Structural Engineering and Mechanics*, 40(1) (2011) 13-28.
- [32] S. Mallat, *A wavelet tour of signal processing*, Elsevier, 1999.
- [33] I. Daubechies, *Ten lectures on wavelets*, Siam, 1992.
- [34] C.R. Farrar, S.W. Doebling, *An overview of modal-based damage identification methods*, Los Alamos National Lab., NM (United States), 1997.
- [35] J. Vanherzeele, S. Vanlanduit, P. Guillaume, Reducing measurement time for a laser Doppler vibrometer using regressive techniques, *Optics and lasers in engineering*, 45(1) (2007) 49-56.
- resolution analysis, *Sensors*, 15(9) (2015) 22750-22775.
- [17] R. Sampaio, N. Maia, J. Silva, Damage detection using the frequency-response-function curvature method, *Journal of sound and vibration*, 226(5) (1999) 1029-1042.
- [18] A. Gentile, A. Messina, On the continuous wavelet transforms applied to discrete vibrational data for detecting open cracks in damaged beams, *International Journal of Solids and Structures*, 40(2) (2003) 295-315.
- [19] S.-T. Quek, Q. Wang, L. Zhang, K.-K. Ang, Sensitivity analysis of crack detection in beams by wavelet technique, *International journal of mechanical sciences*, 43(12) (2001) 2899-2910.
- [20] J.-C. Hong, Y. Kim, H. Lee, Y. Lee, Damage detection using the Lipschitz exponent estimated by the wavelet transform: applications to vibration modes of a beam, *International journal of solids and structures*, 39(7) (2002) 1803-1816.
- [21] Y. Yan, H. Hao, L. Yam, Vibration-based construction and extraction of structural damage feature index, *International journal of solids and structures*, 41(24-25) (2004) 6661-6676.
- [22] J.-G. Han, W.-X. Ren, Z.-S. Sun, Wavelet packet based damage identification of beam structures, *International Journal of Solids and Structures*, 42(26) (2005) 6610-6627.
- [23] B.H. Kim, T. Park, G.Z. Voyiadjis, Damage estimation on beam-like structures using the multi-resolution analysis, *International Journal of Solids and Structures*, 43(14-15) (2006) 4238-4257.
- [24] X. Zhu, S. Law, Wavelet-based crack identification of bridge beam from operational deflection time history, *International Journal of Solids and Structures*, 43(7-8) (2006) 2299-2317.
- [25] S. Zhong, S.O. Oyadiji, Detection of cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed

Please cite this article using:

M. Payasteh, M. Aghajan-nashtaei, M. Taherinasab S.B.beheshti aval, Detection of Damage in Simply-Supported Plates by Discrete Wavelet Transform of Reconstructed Modal Data, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(3)(2019)503-522.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13723.5465

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



