

Damage Detection Of Prefabricated Walls (Panel 3D Plates) Based On Wavelet Transform Detection Algorithm

Mohtasham Khanahmadi¹, Omid Rezaifar^{2*}, Majid Gholhaki²

1- Master of Science, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2 -Associate Professor, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

ABSTRACT

A large number of structures experience minor damage in some elements during operation, therefore, the development of this type of damage reduces the service life of the structures and in some cases leads to total destruction. That's why, today, being assured of the health status of structures and their performance is proposed as one of the most important engineering issues. Considering the limitations of traditional damage detection methods, the methods based on changes in the vibrational characteristics of the structure have been formed. In this paper, given the modes shape of the panel prefabricated wall before and after destruction as a 2-D signal processing, the damaged zone was detected using discrete 2-D wavelet transform. At first, the panel prefabricated wall was modeled in the ABAQUS finite element software, and the frequency analysis was done to extract modal responses and was validated using modal responses of the corresponding laboratory sample. Changes in the values of natural frequencies, as well as the incompatibility of the modes shape based on the Modal Assurance Criterion (MAC) and the angle between the modes shape confirm the damage in the structure. Additionally, diagonal details from differential or summation wavelet transform analysis of the interpolated healthy and damaged modes shape (depending on the angle between the modes shape, if it approximately equals zero degree, the differential of modes shape is analyzed, and if it approximately equals 180 degree, the summation of modes shape is analyzed) indicate more irregularity of the wavelet coefficients in the damaged zone compared to other zones such that the jump relative maxima and minima in the wavelet coefficients have occurred in the damage occurrence zone.

ARTICLE INFO

Receive Date: 08 August 2019

Revise Date: 05 December 2019

Accept Date: 31 December 2019

Keywords:

Structural Health Monitoring
Prefabricated Wall
Mode Shape
Modal Assurance Criterion
Wavelet Transform
Damage Detection

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.197470.1923>

*Corresponding author: Omid Rezaifar
Email address: Orezayfar@semnan.ac.ir

عیب‌یابی دیوارهای پیش‌ساخته (صفحات 3D پانل) مبتنی بر الگوریتم شناسایی تبدیل موجک

محتشم خان احمدی^۱، امید رضایی فر^{۲*}، مجید قلهکی^۲

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

بسیاری از سازه‌ها در طول بهره‌برداری از آن‌ها دچار خسارت‌هایی جزئی در برخی از المان‌ها می‌باشند و در نتیجه گسترش این نوع خسارت‌ها، عمر مفید سازه‌ها کاهش و در برخی موارد دچار تخریب کلی می‌گردند. به همین دلیل امروزه اطمینان از وضعیت سلامت سازه‌ها و عملکرد آن‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل مهندسی مطرح می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های روش‌های سنتی عیب‌یابی، روش‌های بر پایه تغییرات در مشخصه‌های ارتعاشی سازه شکل گرفته‌اند. در این مقاله با در نظر گرفتن شکل مودهای دیوار پیش‌ساخته پانلی در قبل و بعد از خرابی به عنوان یک سیگنال پردازشی دو بعدی، با استفاده از تبدیل موجک گسسته دو بعدی به شناسایی ناحیه خرابی پرداخته شده است. در ابتدا دیوار پیش‌ساخته پانلی در نرم افزار المان محدود ABAQUS مدل‌سازی و جهت استخراج پاسخ‌های مودال، مورد تحلیل فرکانسی واقع شد و با پاسخ‌های مودال نمونه آزمایشگاهی نظیر صحت‌سنجی گردید. تغییرات در مقادیر فرکانس‌های طبیعی و همچنین، عدم سازگاری شکل مودها بر اساس معیار اطمینان مودال (MAC) و زاویه بین شکل مودها، وجود خرابی در سازه را تأیید می‌نماید. نیز، جزئیات قطری حاصل از تحلیل تبدیل موجک تفاضل یا مجموع شکل مودهای سالم و معیوب درون‌یابی شده (بسته به زاویه بین شکل مودها، اگر تقریباً صفر درجه باشد، تفاضل و اگر تقریباً ۱۸۰ درجه باشد، مجموع شکل مودها تحلیل می‌گردد) نشان دهنده نامنظمی بیشتری از ضرایب موجک در نواحی خرابی نسبت به سایر نواحی می‌باشد؛ به طوری که ماکزیمم‌ها و مینیمم‌های نسبی پرش در ضرایب موجک، در محل وقوع خرابی‌ها اتفاق افتاده است.

کلمات کلیدی: پایش سلامت سازه، دیوار پیش‌ساخته، شکل مود، معیار اطمینان مودال، تبدیل موجک، شناسایی خرابی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.197470.1923	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2019.197470.1923	۱۴۰۰/۰۸/۳۰	۱۳۹۸/۱۰/۱۰	۱۳۹۸/۱۰/۱۰	۱۳۹۸/۰۹/۱۴	۱۳۹۸/۰۵/۱۷
			امید رضایی فر		*نویسنده مسئول:	
			Orezayfar@semnan.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

بسیاری از سازه‌های مهندسی در طول بهره‌برداری مقاومت خود را از دست داده و در برخی از المان‌ها دچار خسارت‌های جزئی می‌گردند و در نهایت با تشدید این خسارت‌ها تحت اثر عوامل محیطی (مانند زلزله) و یا عوامل مصنوعی (مانند گودبرداری‌های غیر اصولی و انفجار) منجر به تخریب کلی می‌شوند. با شناسایی محل وقوع خرابی‌های جزئی می‌توان با ترمیم و یا تعویض به موقع المان‌های معیوب از وقوع خسارت‌های جانی و مالی پیش رو ممانعت به عمل آورد. حفاظت از سیستم‌های سازه‌ای و بازبینی شرایط سلامت آن‌ها در یک دوره زمانی منظم، تحت عنوان پایش سلامت سازه^۱ (SHM) مطرح است که یکی از موضوعات مهم مهندسی عمران، مکانیک و هوافضا می‌باشد. در نظارت بر سلامت سازه، چهار سؤال مطرح می‌باشد که عبارت‌اند از [۱]:

- ۱- آیا در سازه آسیب وجود دارد؟ (مطالعه سطح ۱)؛
 - ۲- اگر در سازه آسیب وجود دارد، محل وقوع آن کجاست؟ (مطالعه سطح ۲)؛
 - ۳- در محل وقوع آسیب، شدت خرابی چقدر می‌باشد؟ (مطالعه سطح ۳)؛
 - ۴- عمر باقی‌مانده سازه با محل و شدت خرابی‌های مشخص چقدر است؟ (مطالعه سطح ۴).
- مطالعه سطح ۴ کامل‌ترین سطح از سطوح مطالعاتی پایش سلامت سازه‌ها می‌باشد که می‌تواند به حوزه‌های ارزیابی طراحی سازه یا آنالیز فرسودگی اشاره داشته باشد (در این مقاله مطالعات انجام شده تا سطح ۲ صورت گرفته است).

حوزه نظارت بر سلامت سازه بر اساس ارتعاش، به موضوعی مورد علاقه برای مطالعه جامع روش‌ها و کاربردها تبدیل شده است [۲-۷]. در این میان تبدیل موجک با ایده پردازش سیگنال‌ها در دو دهه اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب نموده است. در حیطه مهندسی عمران، نیولند^۲ [۸-۱۰] اولین کسی بود که با استفاده از مفاهیم موجک به تحلیل پاسخ‌های ارتعاشی پرداخت؛ اگرچه او به طور مشخص به مسئله شناسایی خرابی سازه‌ها نپرداخت، اما معرفی این روش در حل مسائل مهندسی سرآغاز مطالعه پایش سلامت سازه بر پایه موجک شد. سوراس و رواتولو^۳ [۱۱] از تبدیل موجک برای شناسایی خرابی در یک تیر طره‌ای استفاده نمودند و نشان دادند که از تغییرات در ضرایب موجک می‌توان رفتار غیرخطی مرتبط با تنفس ترک (باز و بسته شدن ترک) را شناسایی نمود. ونگ و همکاران^۴ [۱۲] و [۱۳] با استفاده از تبدیل موجک به شناسایی خرابی در تیرها پرداختند. آن‌ها مشاهده نمودند که وجود خرابی سبب القای رشد محلی و ناگهانی ضرایب موجک در نزدیکی مکان خرابی می‌گردد. ژو و لو^۵ [۱۴] به مطالعه رفتار دینامیکی سازه پل تحت شرایط بار محوری متحرک توسط تبدیل موجک پرداختند. آن‌ها نشان دادند که تغییرات چندگانه را می‌توان به آسانی از نظر مکان و شدت شناسایی نمود، حتی اگر اندازه‌گیری‌ها همراه با نویز باشد. روخا و ویلده^۶ [۱۵] به شناسایی خرابی در صفحه فولادی چهار طرف گیردار با استفاده از تبدیل موجک پیوسته پرداختند و نشان دادند که می‌توان مکان خرابی را بدون داشتن هیچ دانش قبلی از رفتار سازه شناسایی نمود. کاتونین^۷ [۱۶] با استفاده از تبدیل موجک گسسته به تحلیل پاسخ‌های مودال تیر ساخته شده از ورق‌های پلیمری جهت شناسایی محل ترک‌های متعدد پرداخت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ضرایب جزئیات دارای اطلاعات مفیدی جهت تشخیص موقعیت ترک‌ها می‌باشد و جهت تشخیص، حذف نوفه از ضرایب لازم است. سولیس و همکاران^۸ [۱۷] جهت شناسایی خرابی سازه با استفاده از شکل مودی سالم و معیوب روشی مبتنی بر تبدیل موجک ارائه نمودند و موفق شدند علاوه بر شناسایی موقعیت خرابی‌ها بر مشکلات مربوط به شناسایی خرابی‌های ابتدا و انتهای طول سازه فائق آیند. کاتونین [۱۸] با استفاده از موجک‌های ناپایدار کوینکس^۹ تحت اثر انرژی‌های مختلف به تجزیه و تحلیل شکل مودهای معیوب صفحات کامپوزیتی پرداخت و نشان داد که با استفاده از این موجک‌ها مکانیسم دقیق خسارت و اجتناب از اثر

¹ Structural Health Monitoring (SHM)

² Newland

³ Surace and Routolo

⁴ Wang et al

⁵ Zhu and Law

⁶ Ruckha and Wilde

⁷ Katunin

⁸ Solis et al

⁹ quincunx

مرزی رخ می‌دهد. پاتل و همکاران^{۱۰} [۱۹] با استفاده از تبدیل موجک به شناسایی خرابی در یک ساختمان بتنی ۶ طبقه پرداختند. آن‌ها با تحلیل موجک پاسخ‌های ارتعاشی ثبت شده تراز هر طبقه برای جرم‌های مختلف نشان دادند که ارتباط مستقیمی بین ضرایب موجک و تغییر در خصوصیات ذاتی سازه از جمله جرم وجود دارد. یانگ و ایادیجی^{۱۱} [۲۰] روش جدیدی جهت شناسایی خرابی صفحات کامپوزیتی چند لایه، با استفاده از سطح فرکانس مودال^{۱۲} (MFS) ارائه نمودند. آن‌ها نشان دادند که کاهش سختی موضعی لایه‌ها باعث اختلال در سطح فرکانس مودال شده و با محاسبه ضریب موجک سطح فرکانس مودال می‌توان محل و شکل خرابی صفحات کامپوزیتی چند لایه را مشخص نمود. خان احمدی و همکاران [۲۱] با استفاده از تبدیل موجک پیوسته به شناسایی موقعیت‌های مختلف خرابی در طول تیر فولادی پرداختند. آن‌ها با مقایسه ضرایب موجک تولید شده حالت‌های سالم و معیوب موفق شدند محل خرابی‌ها را با دقت بالایی شناسایی نمایند. همچنین، آن‌ها در تحقیق دیگری [۲۲] در ارتباط با شناسایی خرابی صفحات فولادی با استفاده از تبدیل موجک گسسته دو بعدی شکل مودها به مقایسه ضرایب موجک حالت‌های سالم و معیوب هشت شکل مود اول پرداختند و نشان دادند که اغتشاشات در ضرایب موجک تولید شده حالت‌های معیوب در مقایسه با ضرایب موجک تولید شده حالت سالم در موقعیت‌های مختلف خرابی چشم‌گیر است و در تمامی مودهای بررسی شده می‌توان محل خرابی‌ها را با دقت بالایی شناسایی نمود. همچنین، آن‌ها نشان دادند که از تحلیل موجک شکل‌های مود اول نسبت به تحلیل موجک شکل‌های مودهای بالاتر، موقعیت خرابی‌ها با هم‌سطحی مناسب‌تری از ضرایب موجک شناسایی می‌گردد.

بر اساس مطالعات صورت گرفته تا به این مرحله از تحقیق، کمتر به موضوع پایش سلامت صفحات پیش‌ساخته 3D پانلی به عنوان یکی از مصالح کامپوزیتی پرکاربرد در مهندسی عمران پرداخته شده است. به همین منظور، موضوع مورد تحقیق این مقاله، شناسایی خرابی صفحات پیش‌ساخته پانلی مبتنی بر تحلیل پاسخ‌های مودال انتخاب گردیده است. در ادامه مبانی ریاضی تبدیل موجک بیان می‌گردد.

۲- تبدیل موجک (Wavelet Transform)

تبدیل موجک یا تبدیل ویولت یکی از روش‌های توانمند پردازش سیگنال‌ها می‌باشد که نسبت به سایر روش‌های پردازش سیگنال (تبدیل فوریه^{۱۳} (FT) و تبدیل فوریه زمان کوتاه^{۱۴} (STFT)) مشکلات مربوط به رزولوشن ثابت را ندارد؛ در واقع تبدیل موجک مجموعی از یک سری توابع اساسی می‌باشد که برای هر رزولوشن فرکانسی تغییر کرده و اجزا فرکانسی در رزولوشن‌های مختلف به دست می‌آید [۲۳] و [۲۴]. تبدیلات موجک به دو صورت تبدیل موجک پیوسته^{۱۵} (CWT) و تبدیل موجک گسسته^{۱۶} (DWT) تعریف شده‌اند که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

۲-۱- تبدیل موجک پیوسته

تبدیل موجک پیوسته سیگنال $x(t)$ در بازه $-\infty$ تا ∞ با رابطه (۱) به صورت زیر تعریف می‌گردد [۲۵ و ۲۶]:

$$\text{CWT}(a, b; x(t), \psi(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt = \langle x(t), \psi_{b,a}(t) \rangle \quad (1)$$

که در آن

¹⁰ Patel et al

¹¹ Yang and Oyadiji

¹² Modal Frequency Surface (MFS)

¹³ Fourier Transform (FT)

¹⁴ Short Time Fourier Transform (STFT)

¹⁵ Continuous Wavelet Transform (CWT)

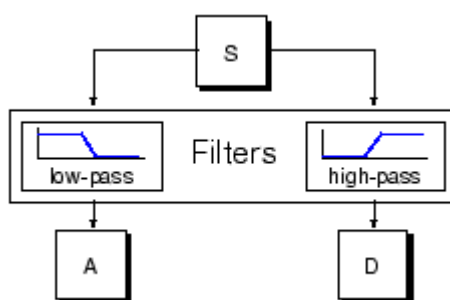
¹⁶ Discrete Wavelet Transform (DWT)

$$\Psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

در رابطه بالا، a پارامتر مقیاس، b پارامتر انتقال و Ψ تابع موجک می‌باشد. نیز، Ψ^* مزدوج مختلط و $\Psi_{b,a}$ نسخه انتقال یافته و مقیاس شده تابع موجک است. پارامتر مقیاس در تبدیل موجک پیوسته به عنوان یک اپراتور ریاضی باعث انقباض یا انبساط سیگنال می‌شود. در تبدیل موجک به طور مستقیم پارامتر فرکانس وجود ندارد، اما در عوض پارامتر مقیاس که به طور معکوس با فرکانس در ارتباط است، وجود دارد. مقیاس‌های بالا متناظر با جزئیات^{۱۷} و مقیاس‌های پایین متناظر با تقریبات^{۱۸} سیگنال می‌باشند. با توجه به اینکه مقیاس a در تعریف تبدیل موجک در مخرج ظاهر شده است، به ازای مقادیر $a < 1$ ، سیگنال فشرده و به ازای مقادیر $a > 1$ ، سیگنال منبسط می‌گردد. نیز، پارامتر انتقال b در تبدیل موجک میزان جابجایی تابع موجک را معلوم می‌کند و اطلاعات زمانی سیگنال را در بردارد.

۲-۲- تبدیل موجک گسسته

در نوع گسسته تبدیل موجک، دو نوع فیلتر به سیگنال اعمال می‌شود که یکی در ارتباط با تقریبات سیگنال (فیلتر پایین گذر) و دیگری در ارتباط با جزئیات سیگنال (فیلتر بالا گذر) می‌باشد [۲۶]. در شکل ۱ فرآیند فیلترینگ سیگنال S در ابتدایی ترین سطح نشان داده شده است.

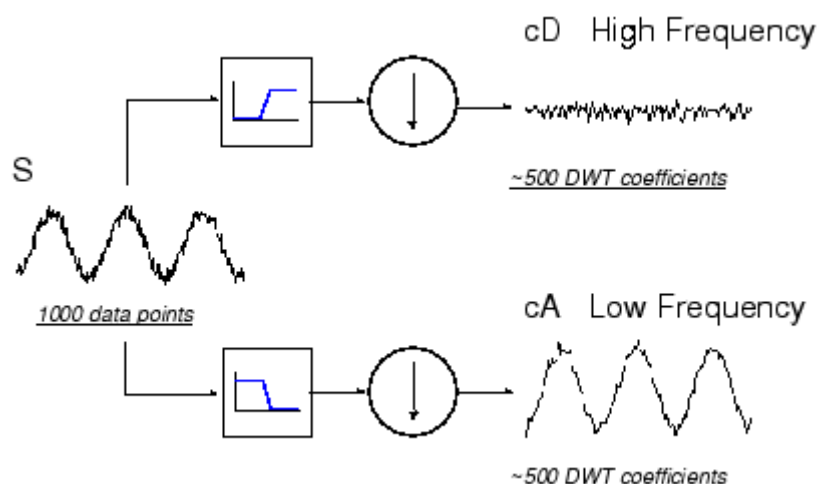


شکل ۱: فرآیند فیلترینگ سیگنال S [۲۶]

در شکل ۲ فرآیند فیلترینگ یک سیگنال سینوسی حاوی ۱۰۰۰ نمونه با نویز اضافه شده به فرکانس در ابتدایی ترین سطح نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که تبدیل موجک گسسته دو سری ضرایب با مقدار تقریبی ۵۰۰ تولید نموده، در حالی که سیگنال اصلی متشکل از ۱۰۰۰ نمونه است. با اعمال فیلترهای پایین گذر و بالا گذر به سیگنال دو سری از ضرایب که یکی در ارتباط با تقریب سیگنال (cA) و دیگری در ارتباط با جزئیات سیگنال (cD) می‌باشد، حاصل شده است؛ به عبارتی، سری ضرایب جزئیات، نویزهای اضافه به فرکانس و سری ضرایب تقریب، شبیه سیگنال اصلی با کاهش زیاد نویز می‌باشد [۲۶].

¹⁷ Details

¹⁸ Approximations



شکل ۲: تجزیه سطح ۱ سیگنال سینوسی نویز دار [۲۶]

در پردازش سیگنال‌ها با استفاده از فرم گسسته تبدیل موجک، گسسته سازی در پارامترهای مقیاس a و انتقال b در رابطه (۲) صورت می‌گیرد. این فرایند در صورتی که به شکل (۳) انجام گیرد، بهینه می‌شود.

$$a = 2^j, b = 2^j k \quad j, k \in Z \quad (3)$$

با جایگذاری رابطه بالا در (۲)، تابع موجک $\psi_{b,a}$ را می‌توان به صورت (۴) بیان نمود.

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \quad (4)$$

در این صورت، جزئیات و تقریبات مرحله j به ترتیب با روابط (۵) و (۶) قابل محاسبه می‌باشد [۲۷].

$$D_j(t) = \sum_{k \in Z} cD_j(k) \psi_{j,k}(t) \quad (5)$$

$$A_j(t) = \sum_{k \in Z} cA_j(k) \phi_{j,k}(t) \quad (6)$$

که در آن Z مجموعه اعداد صحیح مثبت و cD_j و cA_j به ترتیب ضرایب جزئیات و تقریبات مرحله j می‌باشند که با روابط (۷) و (۸) تعیین می‌گردند.

$$cD_j(k) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \psi_{j,k}(t) dt \quad (7)$$

$$cA_j(k) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \phi_{j,k}(t) dt \quad (8)$$

در روابط (۶) و (۸)، ϕ تابع مقیاس می‌باشد. در نهایت سیگنال S را می‌توان با رابطه (۹) به صورت زیر بیان نمود.

$$S(t) = A_j + \sum_{j \leq n} D_j \quad (9)$$

معادلات (۷) و (۸) تبدیل موجک گسسته را به ترتیب در ارتباط با جزئیات و تقریبات سیگنال S نشان می‌دهند.

لازم به ذکر است که تبدیلات موجک قابل تعمیم به صورت دو بعدی می‌باشند. به عنوان مثال، تبدیل موجک پیوسته یک سیگنال دو بعدی $f(x, y)$ را می‌توان با رابطه (۱۰) به صورت زیر تعریف نمود [۲۸]:

$$2DCWT_{a,b_1,b_2}^{\psi} = \frac{1}{\sqrt{a \times a}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \psi^* \left(\frac{x-b_1}{a}, \frac{y-b_2}{a} \right) dx dy \quad (10)$$

به طور مشابه، با گسسته سازی پارامتر مقیاس a و پارامترهای انتقال b_1 و b_2 می توان سیگنال دو بعدی $S_0(n_1, n_2)$ را با رابطه (۱۱) به صورت زیر بازسازی نمود [۲۹].

$$S_0(n_1, n_2) = S_j(n_1, n_2) + \sum_{j \leq n} W_j^1(n_1, n_2) + \sum_{j \leq n} W_j^2(n_1, n_2) + \sum_{j \leq n} W_j^3(n_1, n_2) \quad (11)$$

که در آن $S_j(n_1, n_2)$ ضریب تقریب و ضرایب $W_j^1(n_1, n_2)$ ، $W_j^2(n_1, n_2)$ و $W_j^3(n_1, n_2)$ به ترتیب مربوط به جزئیات افقی، قائم و قطری می باشد.

۳- روش تحقیق

در ابتدا دیوار پیش ساخته 3D پانلی در نرم افزار المان محدود ABAQUS مدل سازی و تحلیل فرکانسی شده و پس از انجام صحت سنجی پاسخ های مودال استخراجی با پاسخ های مودال نمونه آزمایشگاهی مرجع [۳۰]، تفاضل یا مجموع شکل مودهای حالت های سالم و معیوب در راستای بردار نرمال صفحه درون یابی شده و به عنوان یک سیگنال فضایی دو بعدی با استفاده از تبدیل موجک گسسته دو بعدی در محیط نرم افزار MATLAB مورد تحلیل واقع می شوند و طی الگوریتم شناسایی تبدیل موجک، موقعیت های تضعیف شده شناسایی می گردد.

۴- مدل اجزاء محدود دیوار 3D پانل

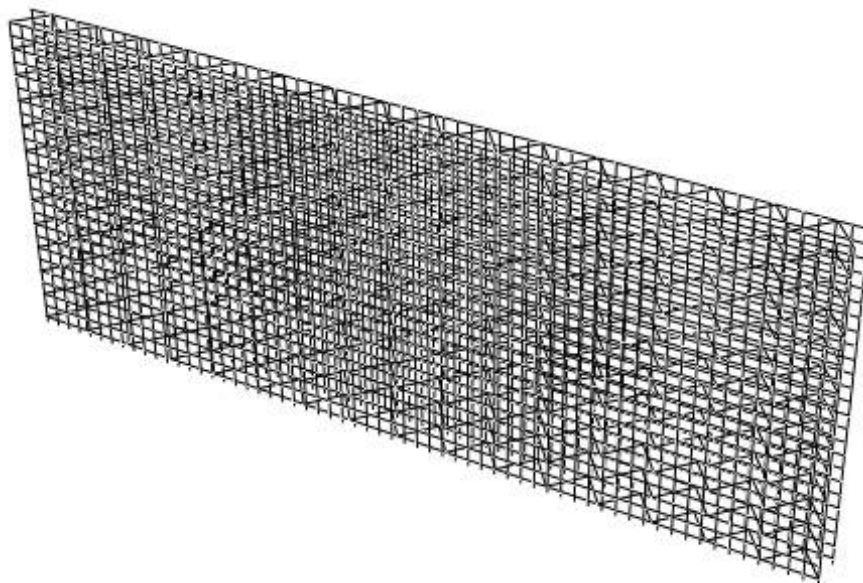
دیوار پیش ساخته پانلی از مطالعه آزمایشگاهی سرخوش [۳۰] در آزمایشگاه تست مودال دانشگاه سمنان جهت مدل سازی در نرم افزار ABAQUS انتخاب شده است. نمونه دیواری مزبور به ابعاد 440×1100 میلی متر می باشد و تمام اجزا تشکیل دهنده آن با مقیاس ۱:۲/۳۵ در نظر گرفته شده اند. ضخامت پوشش های بتنی دو طرف، ۱۷ میلی متر و لایه پلی استایرن، ۲۵/۵ میلی متر است. نیز، قطر مفتول های فلزی ۱ میلی متر می باشد. پس از مراحل ساخت، نمونه آزمایشگاهی با ایجاد شرایط تکیه گاهی آزاد مطابق شکل ۳ جهت برداشت پاسخ های مودال (فرکانس ها و شکل مودها) مورد آزمایش مودال واقع شده است.



شکل ۳: دیوار پانلی پیش ساخته با شرایط تکیه گاهی آزاد [۳۰]

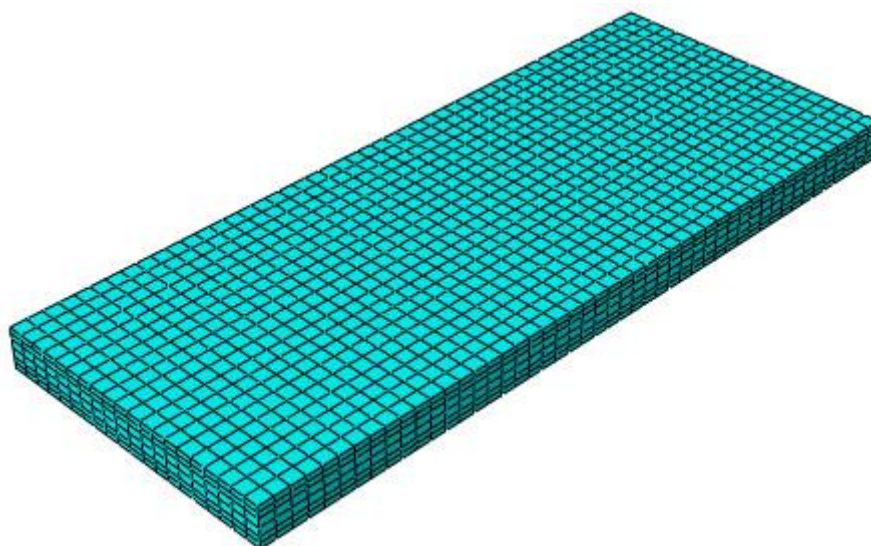
در این مقاله، جهت مدل سازی لایه های بتنی و پلی استایرن در نرم افزار ABAQUS از المان Solid و مفتول های فلزی از المان Wire استفاده شده است. در وسط هر یک از لایه های بتنی یک شبکه فلزی قرار گرفته است به طوری که فاصله دو تار متوالی و همچنین،

دو پود متوالی این شبکه ۱۸ میلی‌متر می‌باشد. شبکه‌های فلزی مزبور با تعداد ۳۲ عدد برشگیر (با اندازه زاویه بین ۷۷/۹۳ درجه) در راستای طول دیوار که فاصله ردیف‌های متوالی از برشگیرها ۳۶ میلی‌متر می‌باشد، مطابق شکل ۴ در اتصال با هم قرار دارند.



شکل ۴: نمایش اتصال شبکه‌های فلزی وسط لایه‌های بتنی توسط مجموعه برشگیرها

جهت استخراج فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای مدل عددی دیوار پانلی و مقایسه آن‌ها با متناظرشان از نمونه آزمایشگاهی، لایه‌های بتنی و همچنین، لایه پلی‌استایرنی با مشبندی دو لایه‌ای مطابق شکل ۵ در نظر گرفته شده است. دیوار پانلی با شرایط تکیه‌گاهی آزاد مورد تحلیل فرکانسی واقع گردیده و خصوصیات قابل قبول مصالح طی عملیات به‌روزرسانی به شرح جدول ۱ محاسبه شده است.



شکل ۵: نمایش مشبندی دو لایه‌ای لایه‌های بتنی و لایه پلی‌استایرن

جدول ۱: خصوصیات قابل قبول مصالح طی به روزرسانی مدل اجزاء محدود

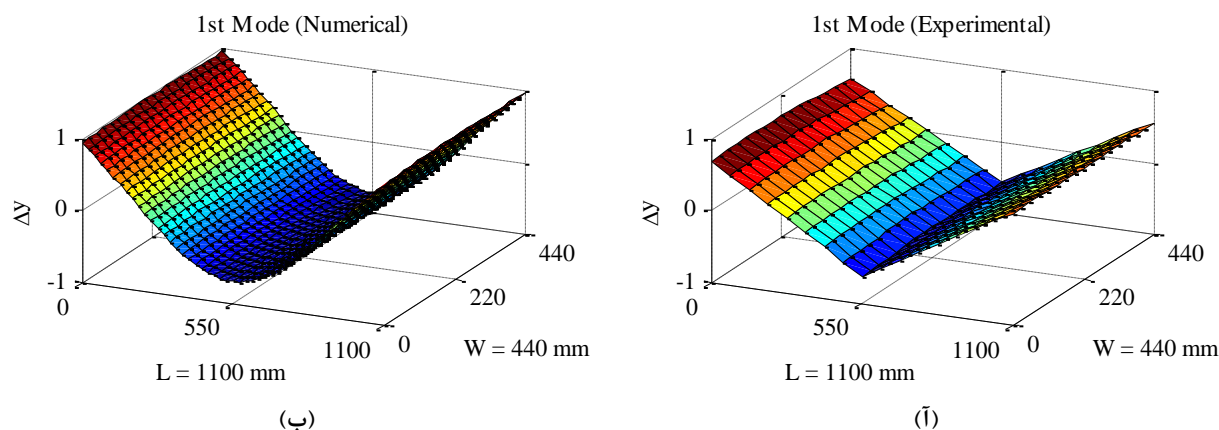
نوع مصالح	مدول الاستیسیته (MPa)	جرم مخصوص (Kg/m^3)	ضریب پواسن	ابعاد مش (mm)
فولادی (S)	۲۰۰۰۰۰	۷۸۵۰	۰/۳	۱۰
بتنی (C)	۱۴۰۰۰	۲۱۷۰	۰/۲	۲۳
پلی استایرن (P)	۲۰	۱۵	۰/۱۷	۲۳

در جدول ۲ فرکانس‌های طبیعی نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که درصد اختلاف فرکانس‌های مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی نظیر بسیار ناچیز بوده و خصوصیات مصالح طی عملیات به روزرسانی به خوبی محاسبه گردیده است.

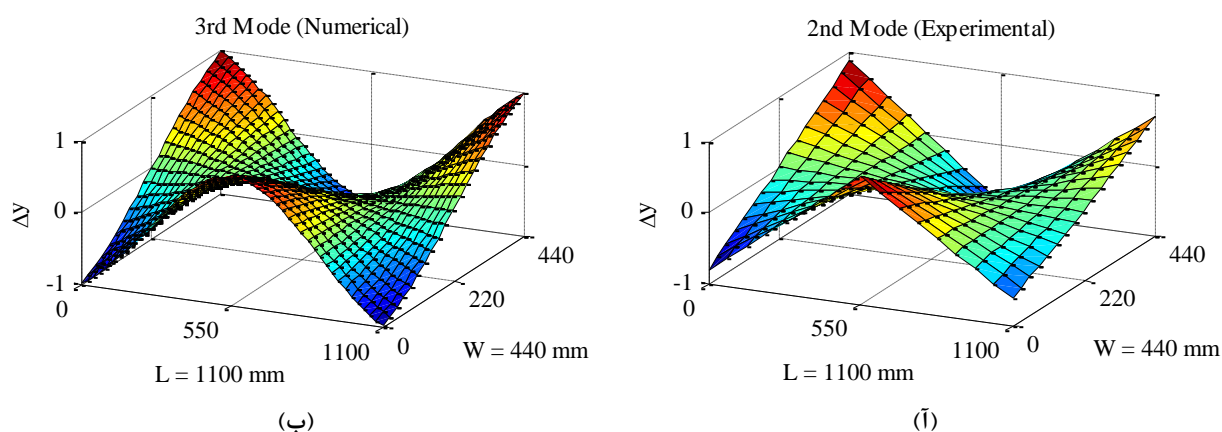
جدول ۲: فرکانس‌های طبیعی نمونه آزمایشگاهی [۳۰] و مدل عددی (Hz)

شماره مود	فرکانس طبیعی نمونه آزمایشگاهی [۳۰]	فرکانس طبیعی مدل عددی	اختلاف ستون‌های ۲ و ۳ (%)
۱	۱۲۸/۵۰	۱۲۸/۱۰	۰/۳۱۱۳
۲	-	۱۳۴/۱۸	-
۳	۲۲۹/۳۰	۲۲۱/۵۰	۳/۴۰۱۷
۴	۲۳۹/۶۰	۲۵۲/۴۱	-۵/۳۴۶۴

همچنین، در شکل‌های ۶ و ۷ شکل مودهای مدل عددی با نمونه آزمایشگاهی نظیرشان مقایسه شده‌اند. به وضوح شباهت شکل مودها مشاهده می‌شود و اگر چنانچه از تعداد سنسورهای بیشتری جهت برداشت جابجایی گره‌ها در آزمایشگاه مودال استفاده می‌گردید، همواری بیشتری در شکل مودهای نمونه آزمایشگاهی مشاهده می‌شد.



شکل ۶: مقایسه (آ) شکل مود اول نمونه آزمایشگاهی [۳۰] و (ب) شکل مود اول مدل عددی

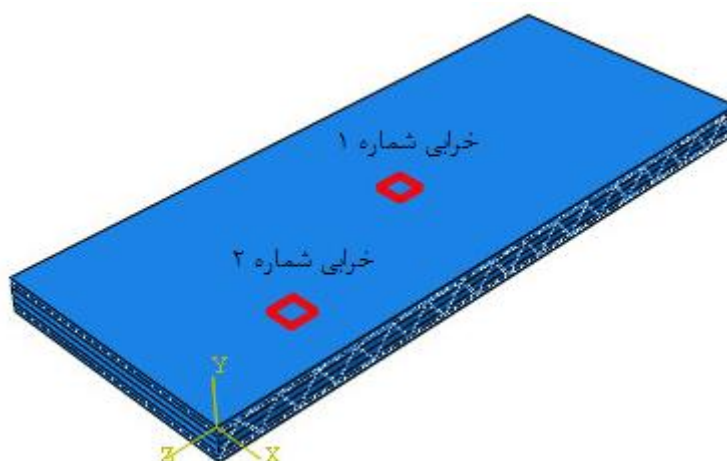


شکل ۷: مقایسه (آ) شکل مود دوم نمونه آزمایشگاهی [۳۰] و (ب) شکل مود سوم مدل عددی

به منظور عیب‌یابی، دیوار پانلی در حالت سالم و حالت‌های خرابی معرفی شده در جدول ۳ مورد تحلیل فرکانسی واقع گردیده است (شکل ۸). لازم به ذکر می‌باشد که خرابی‌ها به صورت کاهش سختی (کاهش مدول الاستیسیته) در لایه بتنی و به عمق ۸/۵ میلی‌متر تعریف شده‌اند.

جدول ۳: مشخصات حالت‌های خرابی D1، D2 و D3 در دیوار پانلی

میزان کاهش سختی (%)	ناحیه خرابی (mm)		ابعاد خرابی (mm)	شماره خرابی	حالت خرابی
	عرضی (W)	طولی (L)			
۲۵٪	۱۹۷-۲۴۳	۵۲۷-۵۷۳	۴۶×۴۶	۱	D1
۳۰٪	۸۷-۱۳۳	۲۵۲-۲۹۸	۴۶×۴۶	۲	D2
۲۵٪	۲۴۳-۱۹۷	۵۲۷-۵۷۳	۴۶×۴۶	۱	D3
۳۰٪	۱۳۳-۸۷	۲۹۸-۲۵۲	۴۶×۴۶	۲	



شکل ۸: نمایش حالات خرابی دیوار پانلی مدل‌سازی شده در ABAQUS

در جدول ۴ فرکانس‌های طبیعی حاصل از تحلیل مودال دیوار پانلی در حالت‌های سالم و معیوب آورده شده است. درصد اختلاف در مقادیر فرکانس‌ها تأییدی بر وجود خرابی در دیوار پانلی می‌باشد (مطالعه سطح ۱).

جدول ۴: فرکانس‌های طبیعی دیوار پانلی در حالت سالم و حالت‌های خرابی D1، D2 و D3 (Hz)

شماره مود	حالت سالم	حالت خرابی			اختلاف فرکانس‌ها (%)		
		D1	D2	D3	ستون‌های ۲ و ۳	ستون‌های ۲ و ۴	ستون‌های ۲ و ۵
۱	۱۲۸/۱۰	۱۲۷/۹۸	۱۲۷/۹۲	۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۱۴	
۲	۱۳۴/۱۸	۱۳۳/۹۰	۱۳۳/۸۶	۰/۲۳	۰/۲۱	۰/۲۴	
۳	۲۲۱/۵۰	۲۲۱/۰۲	۲۲۱/۰۱	۰/۲۰	۰/۲۲	۰/۲۲	
۴	۲۵۲/۴۱	۲۵۱/۹۷	۲۵۱/۹۶	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۸	

همچنین، جهت بررسی وجود خرابی می‌توان اثرات خرابی بر شکل موده‌های سازه (یا اعضای سازه‌ای) را بررسی نمود؛ به عبارتی، به مقایسه شکل موده‌های حالت‌های اولیه (سالم) و ثانویه (معیوب) پرداخت. اگر چنانچه \vec{a} و \vec{b} دو بردار به صورت سطری یا ستونی باشند، در آن صورت ضرب داخلی آن‌ها را می‌توان با رابطه (۱۲) به صورت زیر تعریف نمود:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| |\vec{b}| \cos \theta \quad (12)$$

و در نتیجه، به دست آورد:

$$0 \leq \cos^2 \theta = \frac{|\vec{a} \cdot \vec{b}|^2}{|\vec{a}|^2 |\vec{b}|^2} \leq 1 \quad (13)$$

واضح است اگر چنانچه توان دوم کسینوس زاویه با ابتدای مشترک بین دو بردار برابر با مقدار ۱ و زاویه مورد نظر برابر با صفر باشد، در آن صورت دو بردار \vec{a} و \vec{b} برابر می‌باشند (بر هم منطبق هستند)؛ بنابراین، از این موضوع می‌توان به مقایسه شکل موده‌های اولیه و ثانویه تحویل یافته به صورت بردارهایی سطری یا ستونی پرداخت و وجود خرابی در سازه را بررسی نمود. رابطه (۱۳) به عنوان معیار اطمینان مودال^{۱۹} (MAC) مطرح می‌شود و اگر چنانچه ϕ^{Ud} و ϕ^D به ترتیب ماتریس شکل موده‌های اولیه و ماتریس شکل موده‌های ثانویه باشند، به طوری که هر ستون از این ماتریس‌ها معرف بردار شکل مود i ام باشد، در این صورت معیار اطمینان مودال با رابطه (۱۴) به صورت زیر تعریف می‌گردد [۳۱]:

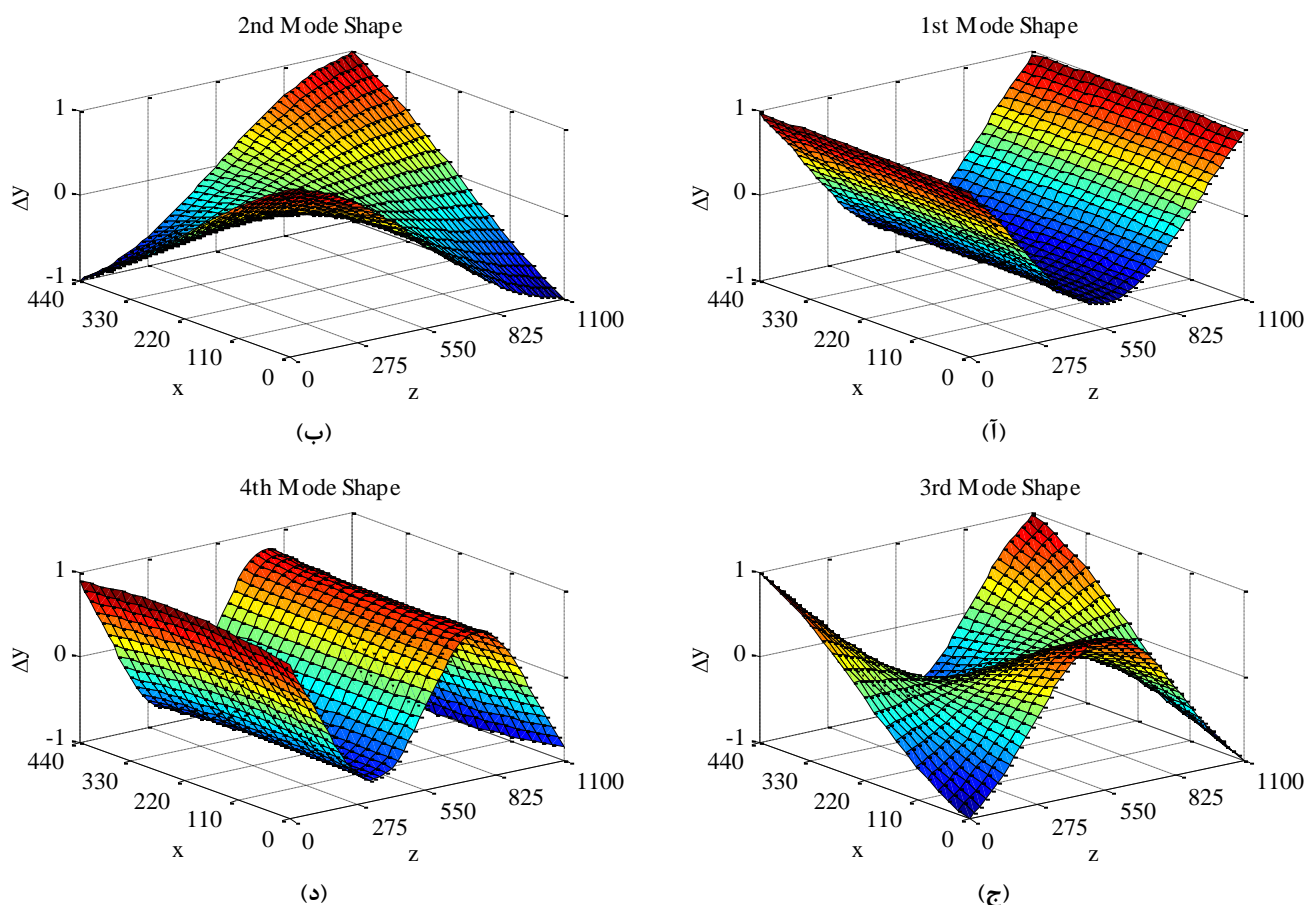
$$MAC(\phi_i^{Ud}, \phi_i^D) = \frac{|\phi_i^{Ud} \cdot \phi_i^D|^2}{|\phi_i^{Ud}|^2 |\phi_i^D|^2} \quad (14)$$

که در آن، ϕ_i^{Ud} و ϕ_i^D به ترتیب بردار شکل اولیه و بردار شکل ثانویه مود i ام می‌باشند.

با توجه به رابطه (۱۳) واضح است که همواره کمترین و بیشترین مقدار معیار اطمینان مودال به ترتیب برابر با صفر و ۱ است. مقادیر کمتر از ۱ نشان دهنده عدم سازگاری شکل مودها می‌باشد؛ به عبارتی وجود خرابی در سازه را تأیید می‌نماید. اگر چنانچه مقدار معیار اطمینان مودال برابر ۱ محاسبه شده باشد، لازم است زاویه بین شکل مودها بررسی گردد؛ در صورتی که زاویه بین شکل مودها، صفر باشد، آنگاه سازه سالم و در غیر این صورت سازه دچار خسارت شده است.

در شکل ۹ چهار شکل مود اول حالت سالم دیوار پانلی نشان داده شده و در جدول ۵ مقادیر معیار اطمینان مودال چهار شکل مود اول حالت‌های سالم و معیوب محاسبه گردیده است. ملاحظه می‌شود که تمامی مقادیر محاسبه شده، کمتر از ۱ می‌باشند و این به معنی عدم سازگاری شکل موده‌های اولیه و ثانویه یا به عبارتی، وجود خسارت در دیوار پانلی می‌باشد.

¹⁹ Modal Assurance Criterion (MAC)



شکل ۹: شکل مودهای حالت سالم دیوار پانلی؛ (آ) مود اول، (ب) مود دوم، (ج) مود سوم، (د) مود چهارم

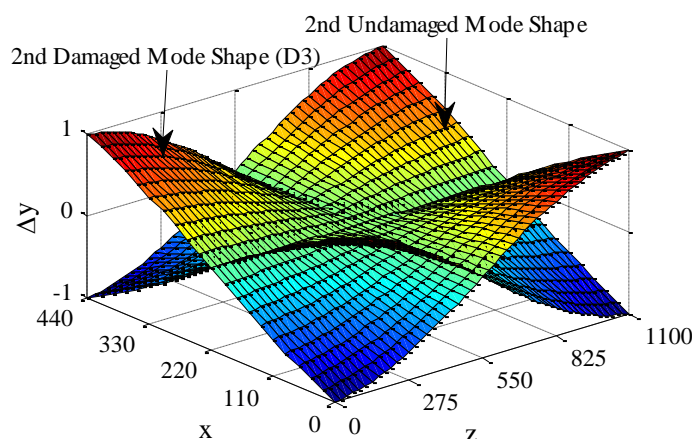
جدول ۵: مقادیر معیار اطمینان مودال (MAC)

شماره مود	$MAC(\phi_1^{Ud}, \phi_1^{D1})$	$MAC(\phi_1^{Ud}, \phi_1^{D2})$	$MAC(\phi_1^{Ud}, \phi_1^{D3})$
۱	۰/۹۹۹۹۹۸۶۹۷	۰/۹۹۹۹۹۸۹۴۳	۰/۹۹۹۹۹۷۹۲
۲	۰/۹۹۹۹۹۹۴۱۶	۰/۹۹۹۹۹۸۲۳۶	۰/۹۹۹۹۹۷۸۹۹
۳	۰/۹۹۹۹۹۹۹۹۳	۰/۹۹۹۹۹۵۸۳۸	۰/۹۹۹۹۹۵۸۷۹
۴	۰/۹۹۹۹۹۹۹۹۷	۰/۹۹۹۹۹۹۱۹۷۶	۰/۹۹۹۹۹۹۲۰۴۹

در جدول ۶ زاویه بین شکل مودهای سالم و معیوب هر یک از حالت‌های خرابی ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت تمامی زوایای بین شکل مودهای حالت‌های سالم و معیوب، غیر صفر می‌باشند و این موضوع نیز وجود خرابی در دیوار پانلی را تأیید می‌نماید. همچنین، با توجه به جدول ۶ مشاهده می‌شود که زاویه بین شکل مود دوم حالت‌های خرابی D2 و D3 با شکل مود دوم حالت سالم تقریباً ۱۸۰ درجه محاسبه شده است. این مفهوم در شکل ۱۰ برای شکل مود دوم حالت‌های سالم و خرابی D3 نشان داده شده است.

جدول ۶: زاویه بین شکل مدهای سالم و معیوب (درجه)

شماره مود	$\angle(\phi_i^{Ud}, \phi_i^{D1})$	$\angle(\phi_i^{Ud}, \phi_i^{D2})$	$\angle(\phi_i^{Ud}, \phi_i^{D3})$
۱	۰/۰۲۰۷	۰/۰۱۸۶	۰/۰۲۶۱
۲	۰/۰۱۳۹	۱۷۹/۹۸	۱۷۹/۹۷
۳	۰/۰۰۱۵	۰/۰۳۶۸	۰/۰۳۶۸
۴	۰/۰۰۱۰	۰/۰۵۱۳	۰/۰۵۱۱



شکل ۱۰: شکل مود دوم حالت‌های سالم و خرابی D3

۵- شناسایی خرابی

جهت شناسایی ناحیه خرابی، تفاضل یا مجموع شکل مدهای سالم و معیوب درون‌یابی شده (در این تحقیق با مرتبه تکرار ۲) و به عنوان یک سیگنال فضایی دو بعدی توسط تبدیل موجک گسسته دو بعدی 2^0 (D2DWT) مورد تحلیل واقع شده است. بررسی‌های اولیه انجام شده نشان می‌دهد که جزئیات قطری حاصل از توابع موجک تحلیلی خانواده Symlet دارای اطلاعات سودمندی جهت کشف خسارت صفحات پانلی می‌باشند. همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد که تابع موجک sym4 به عنوان یکی از توابع تحلیلی خانواده Symlet عملکرد شناسایی بهینه‌تری نسبت به سایر توابع موجک این خانواده دارد. در ادامه مراحل شناسایی خرابی توسط تابع موجک sym4 به شرح زیر ارائه می‌گردد:

گام ۱: فراخوانی شکل مدهای سالم و معیوب به محیط نرم افزار MATLAB؛

گام ۲: محاسبه تفاضل یا مجموع شکل مدهای سالم و معیوب (M)؛

گام ۳: افزایش حساسیت تفاضل یا مجموع شکل مدهای حاصل از گام ۲ از طریق درون‌یابی ($M_i = \text{interp2}(M, 2)$)؛

گام ۴: استخراج ضرایب موجک حاصل از جزئیات قطری تبدیل موجک گسسته دو بعدی ماتریس M_i توسط تابع تحلیلی sym4

(ضرایب cD)؛

گام ۵: ترسیم ضرایب موجک تولید شده (cD) در صفحه دیوار پانلی (شناسایی خرابی).

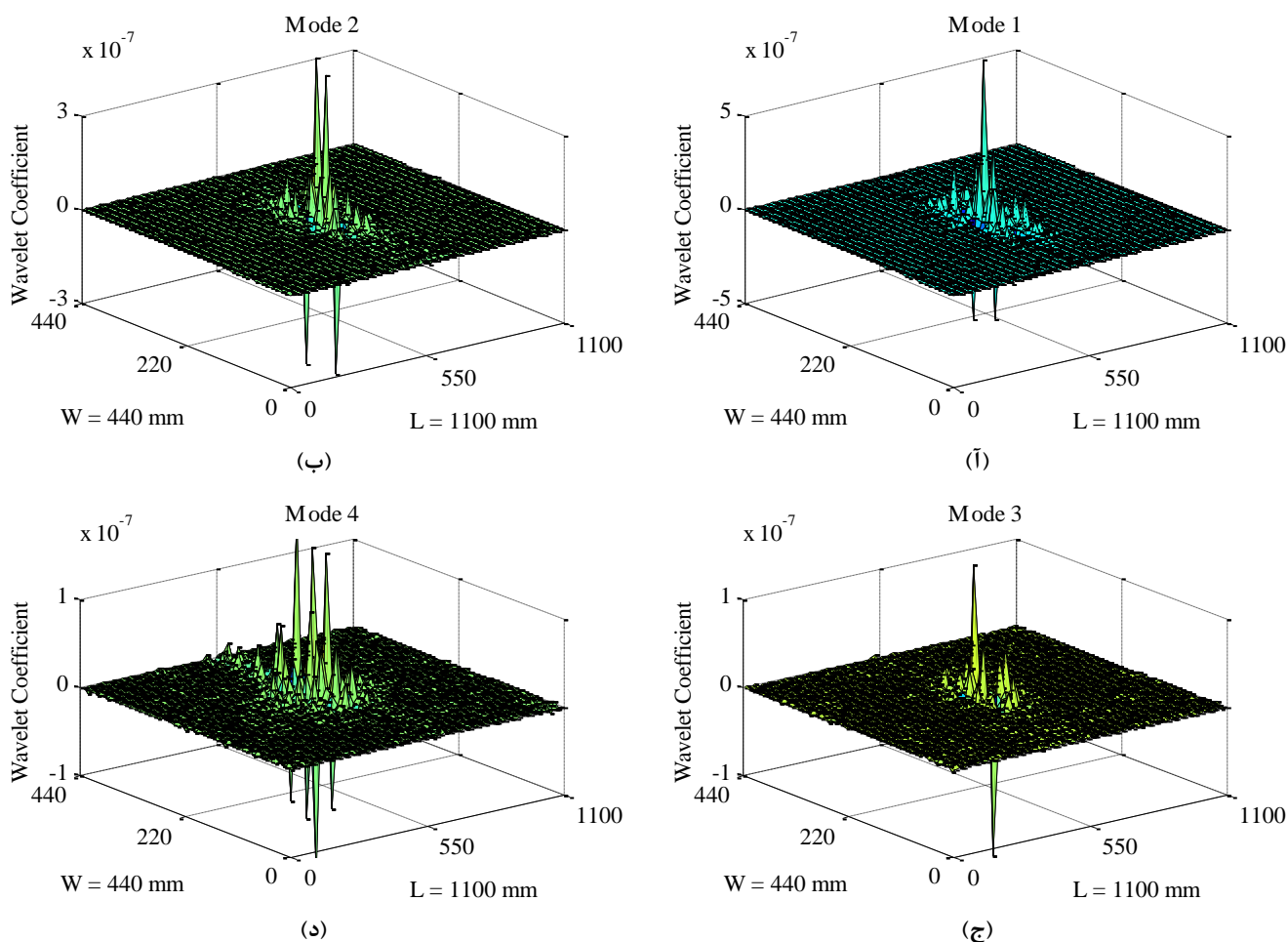
توجه: در گام ۲، بسته به اینکه اندازه زاویه بین شکل مدها تقریباً صفر درجه محاسبه شده باشد، از تفاضل و اگر تقریباً ۱۸۰ درجه محاسبه شده باشد، از مجموع شکل مدها استفاده می‌گردد؛ بنابراین، جهت شناسایی ناحیه خرابی در مود دوم حالات خرابی D2 و

²⁰ Discrete 2-D Wavelet Transform (D2DWT)

D3، از مجموع و در سایر مودها، از تفاضل شکل مودها استفاده گردیده است.

۵-۱- بررسی حالت خرابی D1

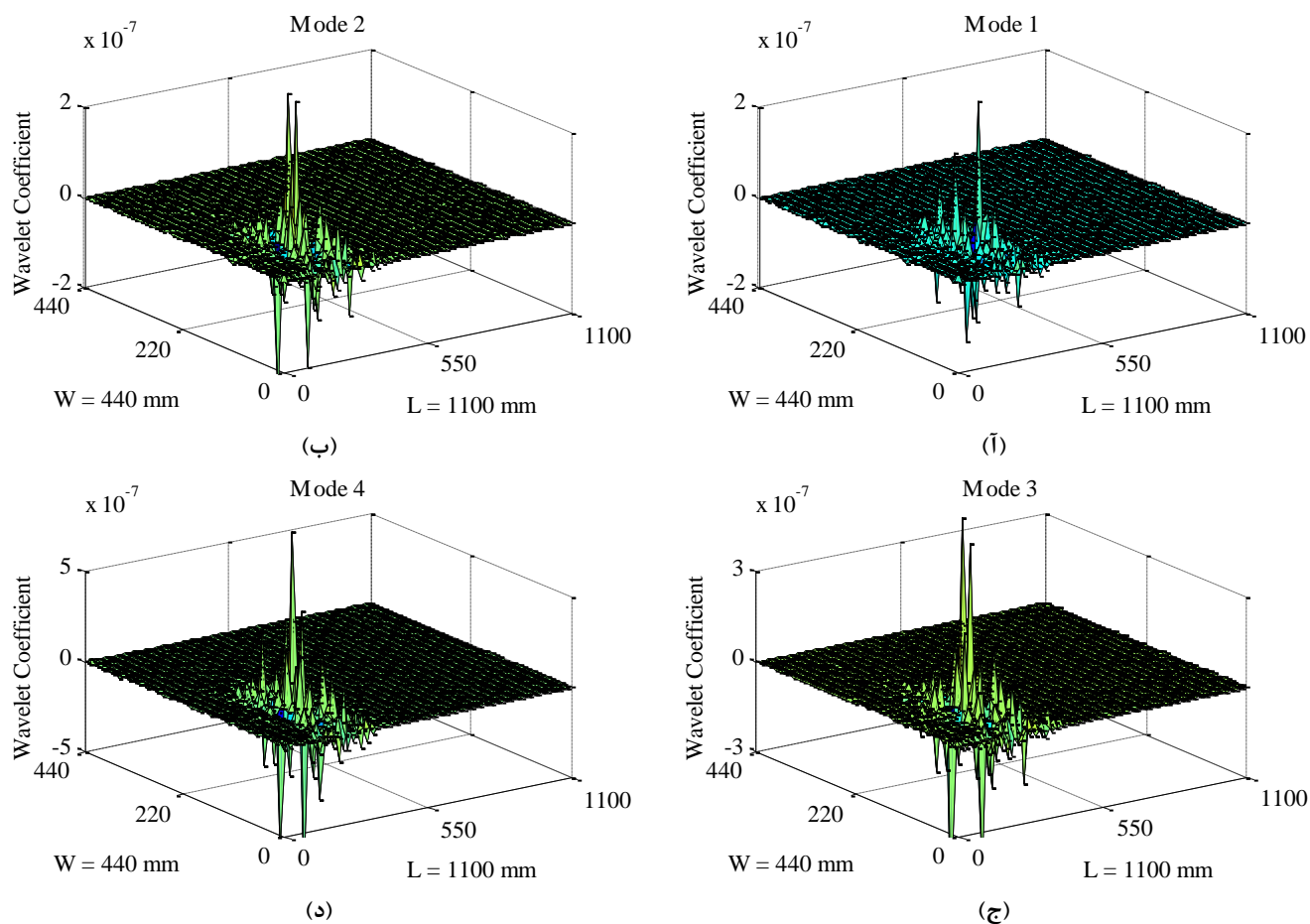
با توجه به زاویه بین شکل مودهای حالت خرابی D1 و حالت سالم، در بررسی‌های شناسایی محل خرابی از تفاضل شکل مودهای سالم و معیوب در گام دوم استفاده شده است. نتایج تحلیل موجک sym4 در شکل ۱۱ اغتشاش بیشتری از ضرایب موجک را در محل خرابی نشان می‌دهد؛ به طوری که ماکزیمم و مینیمم پرش در ضرایب موجک در ناحیه خرابی اتفاق افتاده است.



شکل ۱۱: تحلیل موجک حالت خرابی D1: (آ) مود اول، (ب) مود دوم، (ج) مود سوم، (د) مود چهارم

۵-۲- بررسی حالت خرابی D2

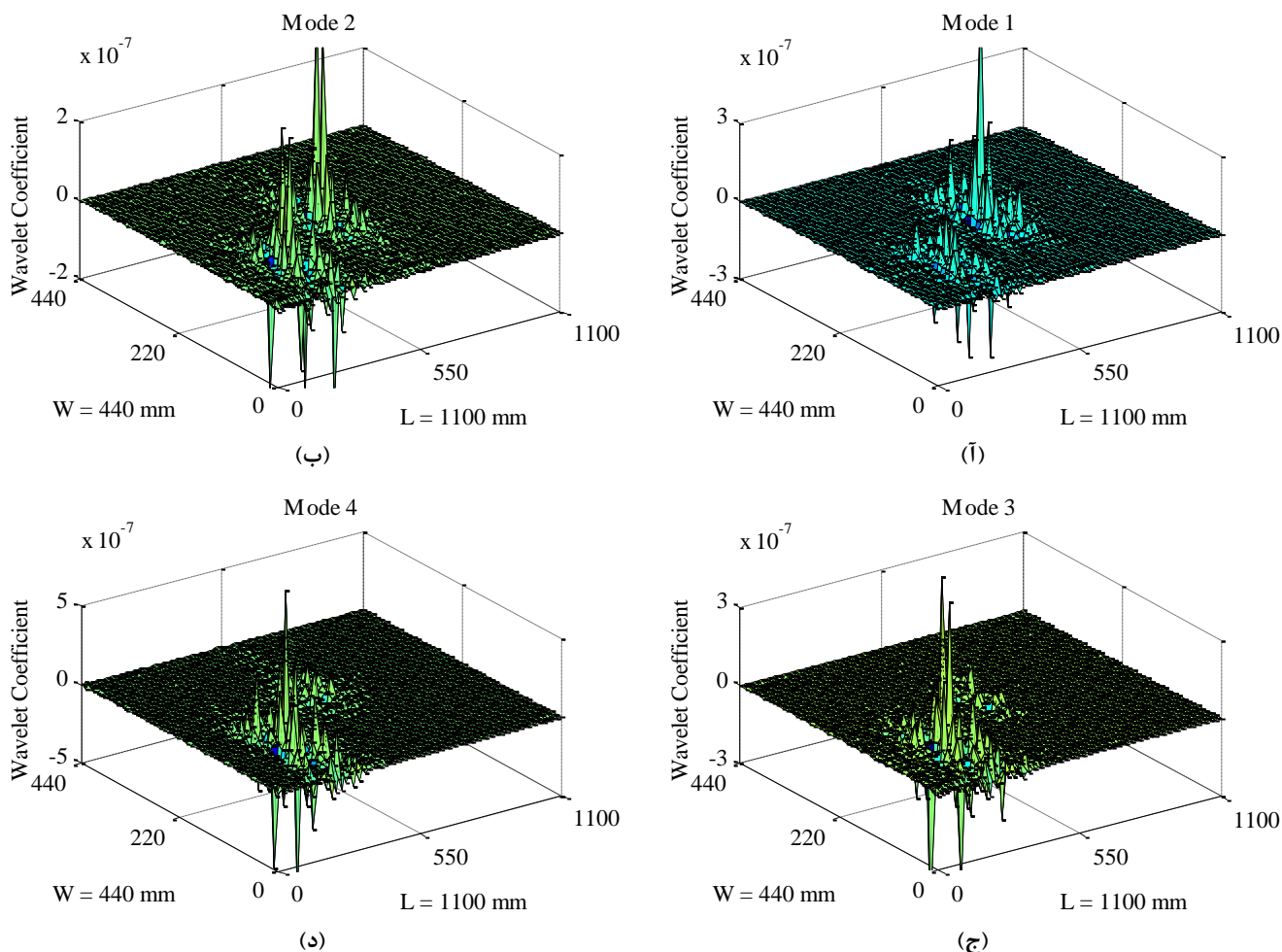
نتایج بررسی‌های هر چهار مود اول حالت خرابی D2 در شکل ۱۲ آورده شده است. مشاهده می‌گردد که روش پیشنهادی توانسته است با موفقیت محل خرابی را در هر چهار مود بررسی شده شناسایی نماید. لازم به ذکر می‌باشد که در گام دوم تحلیل موجک مود دوم حالت خرابی D2، از مجموع شکل مودهای سالم و معیوب و در بررسی‌های مودهای دیگر از تفاضل شکل مودها استفاده شده است.



شکل ۱۴: تحلیل موجک حالت خرابی D2؛ (آ) مود اول، (ب) مود دوم، (ج) مود سوم، (د) مود چهارم

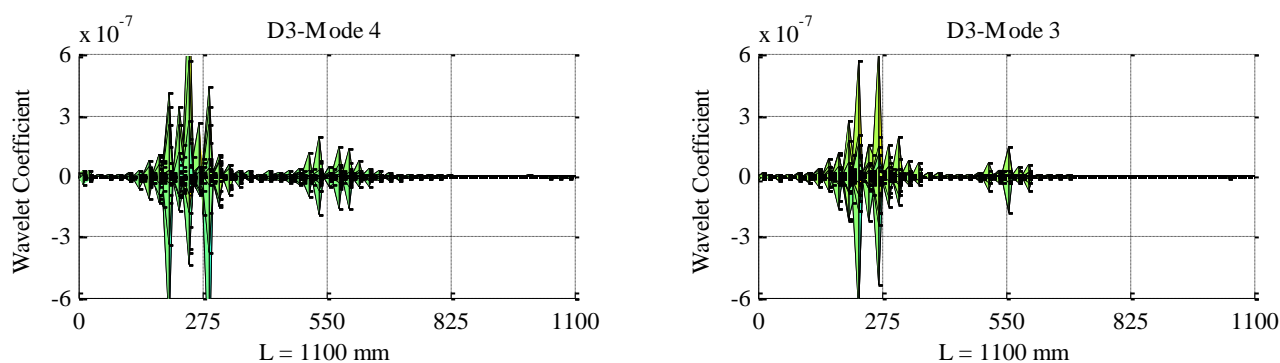
۵-۳- بررسی حالت خرابی D3

به منظور بررسی قابلیت شناسایی تعداد خرابی‌های بیشتر با روش پیشنهادی، مسئله شناسایی همزمان دو حالت خرابی D1 و D2 به عنوان حالت خرابی D3 مورد بررسی واقع گردید. نتایج بررسی‌ها در شکل ۱۳ نشان دهنده توانمندی بالای روش پیشنهادی در شناسایی تعداد خرابی‌های بیشتر می‌باشد.



شکل ۱۳: تحلیل موجک حالت خرابی D3: (آ) مود اول، (ب) مود دوم، (ج) مود سوم، (د) مود چهارم

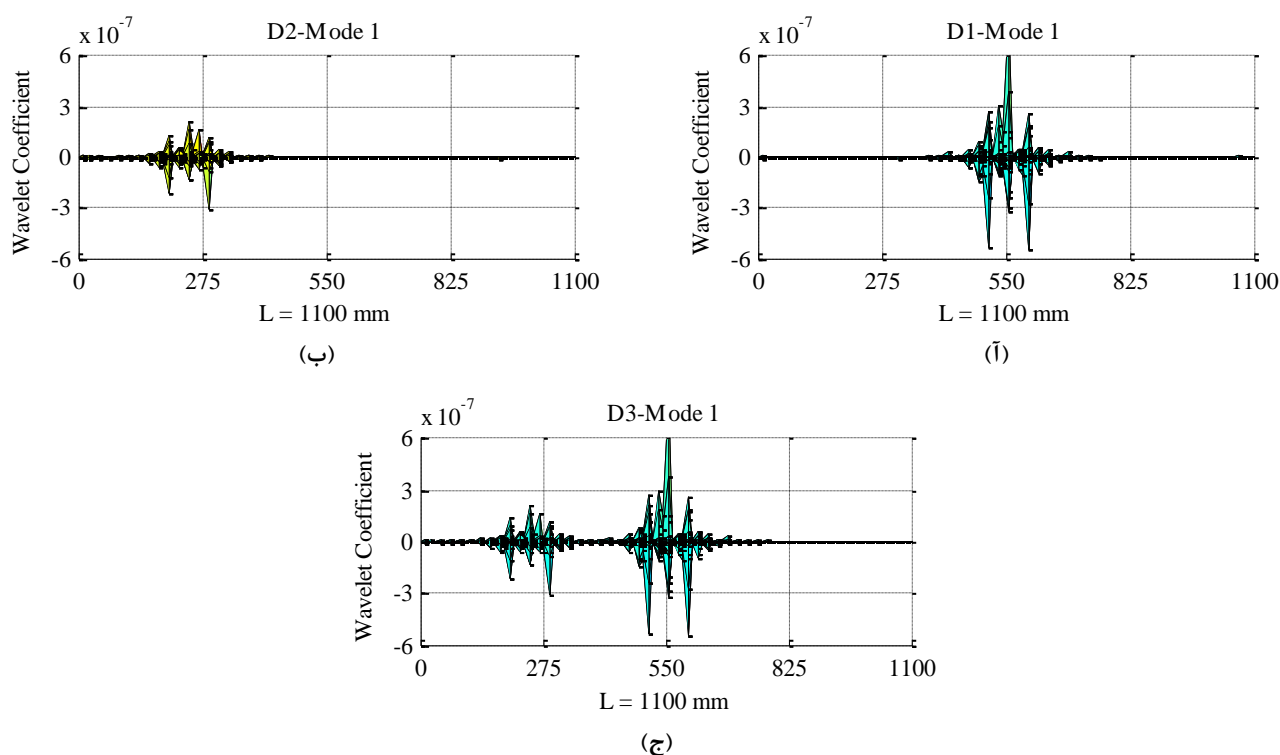
مشاهده می‌شود که موقعیت خرابی‌های ۱ و ۲ با اغتشاشات در ضرایب موجک حاصل از جزئیات قطری شناسایی شده است؛ به طوری که ماکزیمم‌ها و مینیمم‌های نسبی پرش در ضرایب موجک در محل وقوع خرابی‌ها اتفاق افتاده است. همچنین، از شکل ۱۳ مشاهده می‌گردد تحلیل‌های موجک انجام شده مدهای سوم و چهارم در محل خرابی ۲ اغتشاشات در ضرایب موجک تولید شده را نسبت به محل خرابی ۱ چشمگیرتر نشان می‌دهد، این موضوع به صورت دو بعدی در راستای طول دیوار پانلی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که ماکزیمم‌ها و مینیمم‌های نسبی در موقعیت‌های خرابی اتفاق افتاده است و ضرایب موجک تولید شده نواحی سالم صفر (بسیار نزدیک به صفر) محاسبه شده است.



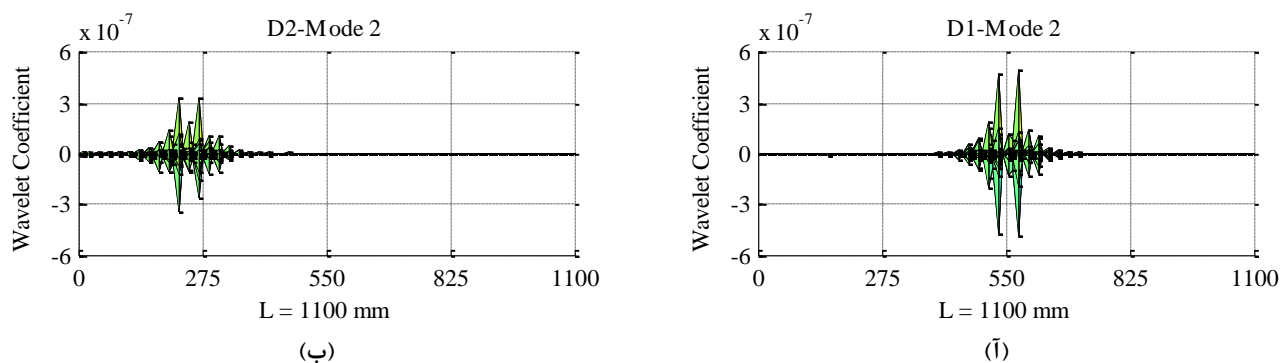
شکل ۱۴: نمایش ضرایب موجک حالت خرابی D3 در راستای طول دیوار پانلی؛ (آ) مود سوم، (ب) مود چهارم

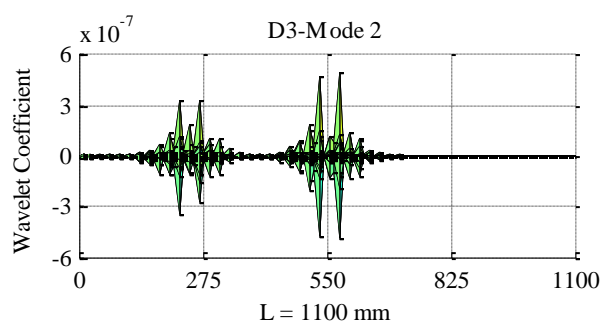
۶- نتایج و بحث در آنها

بررسی‌های مقایسه‌ای ضرایب موجک تولید شده در محل خرابی حالت‌های D1 و D2 نسبت به ضرایب موجک تولید شده محل‌های خرابی نظیر در حالت D3 در مود اول نشان می‌دهد که حساسیت ضرایب موجک محل‌های مختلف خرابی مستقل از هم می‌باشند. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نمودار ضرایب موجک تولید شده مودهای اول و دوم حالت‌های خرابی در راستای طول دیوار نشان داده شده است. به وضوح مشاهده می‌گردد که حساسیت ضرایب موجک در محل هر خرابی مستقل از محل خرابی دیگر می‌باشد.



شکل ۱۵: مقایسه ضرایب موجک مود اول حالت‌های خرابی D1، D2 و D3؛ (آ) خرابی D1؛ (ب) خرابی D2؛ (ج) خرابی D3

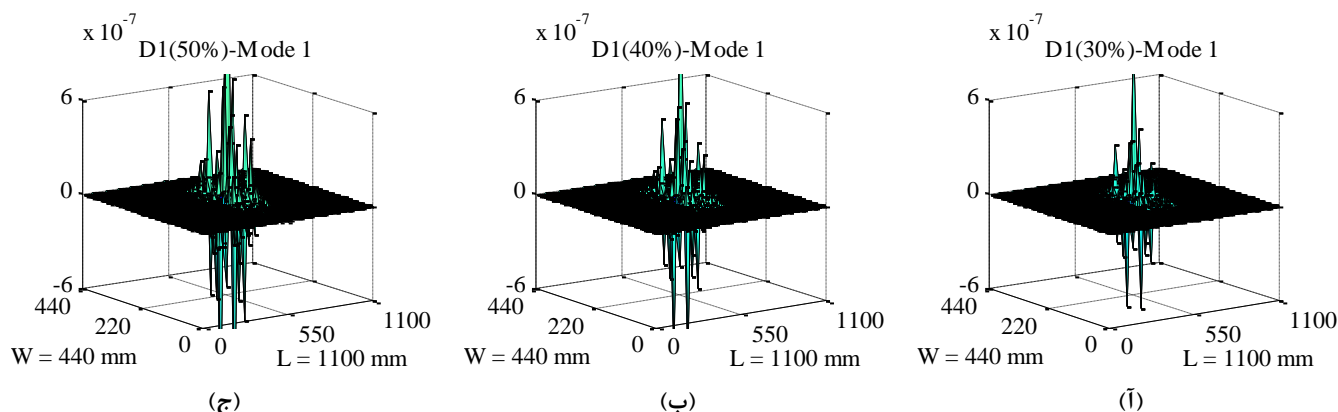




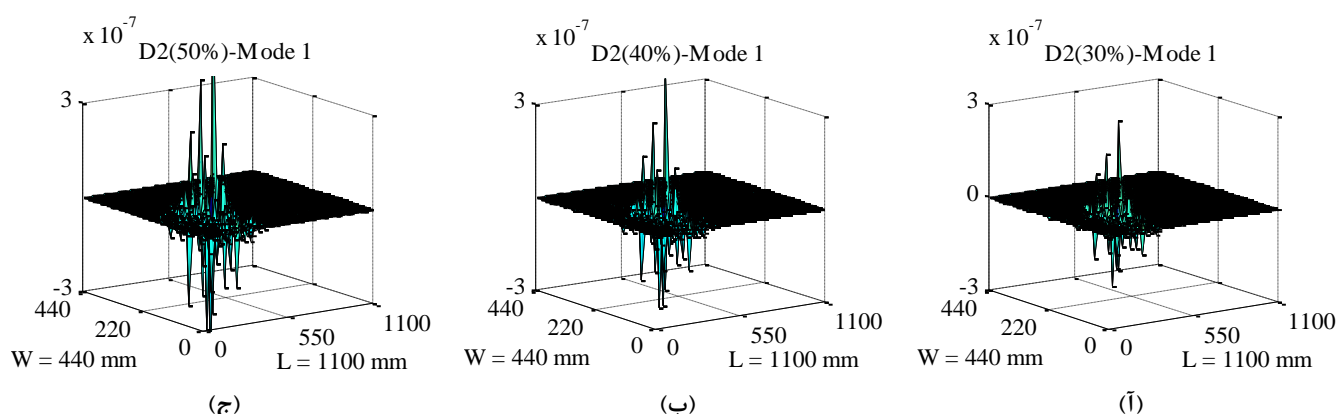
(ج)

شکل ۱۶: مقایسه ضرایب موجک مود دوم حالت‌های خرابی D1، D2 و D3 (آ) خرابی D1؛ (ب) خرابی D2؛ (ج) خرابی D3

لازم به ذکر می‌باشد که موقعیت‌های خرابی ۱ (حالت D1) و ۲ (حالت D2) در مود اول در شدت‌های خرابی صفر تا ۹۰ درصد (با گام ۱۰ درصدی به صورت کاهش درصدی سختی) نیز جهت شناسایی مورد تحلیل موجک واقع شده‌اند. در تمامی شدت‌های خرابی بررسی شده، اغتشاشات در ضرایب موجک در محل‌های خرابی اتفاق افتاده است. در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ توزیع ضرایب موجک تولید شده مود اول برای سه شدت خرابی ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصدی حالت‌های خرابی D1 و D2 در سطح دیوار نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش شدت خرابی‌ها، حساسیت ضرایب موجک در محل خرابی‌ها افزایش یافته است؛ بنابراین، حساسیت در ضرایب موجک یک محل از خرابی مستقل از سایر محل‌های خرابی با شدت‌های مختلف بوده و تنها با افزایش شدت خرابی آن محل افزایش می‌یابد.



شکل ۱۷: توزیع ضرایب موجک مود اول حالت خرابی D1 در سطح دیوار با شدت خرابی (آ) ۳۰٪؛ (ب) ۴۰٪؛ (ج) ۵۰٪



شکل ۱۸: توزیع ضرایب موجک مود اول حالت خرابی D2 در سطح دیوار با شدت خرابی (آ) ۳۰٪؛ (ب) ۴۰٪؛ (ج) ۵۰٪

در تمامی شدت‌های بررسی شده، اگر چنانچه ماکزیمم ضرایب موجک در محل وقوع خرابی‌ها به عنوان مرکز شناسایی شده

خرابی معرفی گردد، در این صورت مرکز واقعی خرابی‌ها با خطای ناچیز کمتر از ۳٪ شناسایی می‌گردد. نتایج این بررسی‌ها برای سه شدت خرابی ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ در مود اول در جدول ۷ گزارش شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد در شدت‌های مختلف خرابی، مختصات مکانی ماکزیمم ضرایب موجک تولید شده در محل‌های خرابی ثابت می‌ماند؛ به عبارتی، با افزایش شدت خرابی، ماکزیمم ضرایب موجک تولید شده محل خرابی‌ها در یک موقعیت ثابت افزایش می‌یابد.

جدول ۷: شناسایی مرکز خرابی‌ها بر مبنای ماکزیمم ضرایب موجک

ماکزیمم خطا (%)	مرکز شناسایی شده خرابی		مرکز واقعی خرابی		ماکزیمم ضرایب موجک	شدت خرابی	حالت خرابی
	x/W	z/L	x/W	z/L			
۱/۱۶	۰/۵۱۱۶	۰/۵۰۵۱	۰/۵۰	۰/۵۰	$۱/۰۶۱ \times ۱۰^{-۶}$	٪۳۰	D1
۱/۱۶	۰/۵۱۱۶	۰/۵۰۵۱	۰/۵۰	۰/۵۰	$۱/۵۲۴ \times ۱۰^{-۶}$	٪۴۰	
۱/۱۶	۰/۵۱۱۶	۰/۵۰۵۱	۰/۵۰	۰/۵۰	$۲/۰۶۱ \times ۱۰^{-۶}$	٪۵۰	
۲/۹۱	۰/۲۷۹۱	۰/۲۶۲۶	۰/۲۵	۰/۲۵	$۳/۱۴۷ \times ۱۰^{-۷}$	٪۳۰	D2
۲/۹۱	۰/۲۷۹۱	۰/۲۶۲۶	۰/۲۵	۰/۲۵	$۴/۸۹۸ \times ۱۰^{-۷}$	٪۴۰	
۲/۹۱	۰/۲۷۹۱	۰/۲۶۲۶	۰/۲۵	۰/۲۵	$۷/۳۱۶ \times ۱۰^{-۷}$	٪۵۰	

همچنین، بررسی‌ها جهت شناسایی مرکز خرابی‌ها بر مبنای مینیمم ضرایب موجک تولید شده در محل وقوع خرابی‌ها صورت گرفته است. نتایج برای سه شدت خرابی ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ در جدول ۸ گزارش شده است. مشاهده می‌گردد که مرکز واقعی خرابی‌ها بر مبنای مینیمم ضرایب موجک در شدت‌های مختلف با خطای ناچیز کمتر از ۵٪ شناسایی شده و با افزایش شدت خرابی‌ها، مینیمم ضرایب موجک کاهش می‌یابد.

جدول ۸: شناسایی مرکز خرابی‌ها بر مبنای مینیمم ضرایب موجک

ماکزیمم خطا (%)	مرکز شناسایی شده خرابی		مرکز واقعی خرابی		مینیمم ضرایب موجک	شدت خرابی	حالت خرابی
	x/W	z/L	x/W	z/L			
۴/۵۵	۰/۵۱۱۶	۰/۵۴۵۵	۰/۵۰	۰/۵۰	$-۶/۹۷۵ \times ۱۰^{-۷}$	٪۳۰	D1
۴/۵۵	۰/۵۱۱۶	۰/۵۴۵۵	۰/۵۰	۰/۵۰	$-۱/۰۴۹ \times ۱۰^{-۶}$	٪۴۰	
۴/۵۵	۰/۵۱۱۶	۰/۵۴۵۵	۰/۵۰	۰/۵۰	$-۱/۵۰۴ \times ۱۰^{-۶}$	٪۵۰	
۲/۹۱	۰/۲۷۹۱	۰/۲۴۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	$-۲/۱۳۵ \times ۱۰^{-۷}$	٪۳۰	D2
۲/۹۱	۰/۲۷۹۱	۰/۲۴۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	$-۲/۸۵۹ \times ۱۰^{-۷}$	٪۴۰	
۲/۹۱	۰/۲۷۹۱	۰/۲۴۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	$-۴/۶۲۰ \times ۱۰^{-۷}$	٪۵۰	

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

امروزه اطلاع از وضعیت سلامت سازه‌ها و تعلقات آن‌ها بر اساس ارتعاش، به موضوعی مورد علاقه برای مطالعه جامع روش‌ها و کاربردها تبدیل شده است. در این میان، تبدیل موجک با ایده پردازش سیگنال‌ها توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب نموده است. با توجه به مطالعات انجام شده در حوزه پایش سلامت سازه‌ها، کمتر به موضوع شناسایی خرابی در دیوارهای پیش ساخته پانلی (3D پانل‌ها) پرداخته شده است. به همین دلیل موضوع مورد تحقیق این مقاله، شناسایی خرابی صفحات پیش ساخته پانلی با استفاده از تبدیل موجک گسسته دو بعدی به عنوان یکی از مهم‌ترین تبدیلات ریاضی پردازش سیگنال‌ها مورد توجه واقع گردید. در ابتدا دیوار پانلی در نرم افزار المان محدود ABAQUS مدل‌سازی و مورد تحلیل مودال واقع شد و پاسخ‌های مودال استخراجی (فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها) با پاسخ‌های مودال نمونه آزمایشگاهی نظیر صحت سنجی گردید. در مرحله اول از شناسایی خرابی، تغییرات در مقادیر فرکانس‌های طبیعی و همچنین، عدم سازگاری شکل مودهای سالم و معیوب بر اساس معیار اطمینان مودال (MAC) و زاویه بین شکل مودها، وجود خرابی در سازه را تأیید نمود. در مرحله دوم، تفاضل یا مجموع شکل مودهای حالت‌های سالم و معیوب (بسته به زاویه بین شکل مودها) درون‌یابی

شده و با استفاده از تبدیل موجک گسسته دو بعدی مورد تحلیل واقع گردید. بررسی‌های اولیه نشان داد که توابع موجک خانواده Symlet عملکرد شناسایی موفق‌تری داشته و تابع sym4 به عنوان مناسب‌ترین تابع موجک جهت شناسایی خرابی معرفی گردید. تحلیل موجک تفاضل یا مجموع شکل موده‌های سالم و معیوب هر یک از حالات خرابی، اغتشاشات بیشتری از ضرایب موجک حاصل از جزئیات قطری را در محل خرابی‌ها نشان می‌دهد؛ به طوری که ماکزیمم‌ها و مینیمم‌های پرش در ضرایب موجک در محل وقوع خرابی‌ها اتفاق افتاده است. نتایج نشان دهنده قابلیت بالای روش پیشنهادی (تحلیل تبدیل موجک گسسته دو بعدی تفاضل یا مجموع شکل موده‌های درون‌یابی شده و استخراج جزئیات قطری) در شناسایی موقعیت‌های خرابی صفحات پیش ساخته پانلی می‌باشد؛ به طوری که حساسیت ضرایب موجک در محل‌های مختلف خرابی مستقل از هم بوده و با افزایش شدت خرابی محل مورد نظر افزایش می‌یابد. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن ماکزیمم یا مینیمم ضرایب موجک تولید شده در محل وقوع خرابی‌ها به عنوان مرکز خرابی، می‌توان مرکز خرابی‌ها را با خطای کمتر از ۵٪ شناسایی نمود. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شدت خرابی محل مورد نظر، ماکزیمم و مینیمم ضرایب موجک تولید شده آن محل در یک موقعیت ثابت به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1] Rytter, A., (1993). "Vibration based inspection of civil engineering structures", Ph.D Thesis, Aalborg University, Denmark.
- [2] Friswell, M., and Penny, J., (1992). "A simple nonlinear modal of a cracked beam", Proceeding of the 10th International Modal Analysis Conference, San Diego, California, 1, pp. 516-521.
- [3] Dimarogonas, A., (1996). "Vibration of cracked structures: A state of the art review", Engineering Fracture Mechanics, 55, pp. 831-857.
- [4] Salawu, O., (1997), "Detection of structural damage through changes in frequency: A Review", Engineering Structures, 19(9), pp. 718-723.
- [5] Sohn, H., Farrar, C., Hemez, F., Shunk, D., Stinemates, D., and Nadler, B., (2003). "A review of structural health monitoring literature: 1996-2001", Los Alamos National Laboratory, USA.
- [6] Sabnavis, G., Kirk, R., and Kasarda, M., (2004). "Cracked shaft detection and diagnostics: A literature review", Shock and Vibration Digest, 36, pp. 287-296.
- [7] Havaei, G. R., (2016). "Sensitivity based analyses by artificial earthquake by measuring structural accelerations for damage assessment", Journal of Structural and Construction Engineering, 2(4), pp. 104-116.
- [8] Newland, D., (1993). "An introduction to random vibrations, spectral and wavelet analysis", 3rd ed. Harlow: Longman Scientific and Technical.
- [9] Newland, D., (1994). "Wavelet analysis of vibration. Part 1: Theory", Journal of Vibration and Acoustic, 116, pp. 409-416.
- [10] Newland, D., (1994). "Wavelet analysis of vibration. Part 2: Wavelet maps", Journal of Vibration and Acoustic, 116, pp. 417-424.
- [11] Surace, C., and Ruotolo, R., (1994). "Crack detection of a beam using the wavelet transform", Proceedings the 12th International Modal Analysis Conference, Honolulu, Hawaii, 1, pp. 1141-1147.
- [12] Liew, K., and Wang, Q., (1998). "Application of wavelet theory for crack identification in structures", Journal of Engineering Mechanics ASCE, 124(2), pp. 152-157.
- [13] Wang, Q., Wang, D., and Su, X., (1999). "Crack detection of structure for plane problem with spatial wavelets", Acta Mech Sin, 15(1), pp. 39-51.
- [14] Zhu, X., and Law, S., (2006). "Wavelet-based crack identification of bridge beam from operational deflection time history", International Journal of Solids and Structures, 43, pp. 2299-2317.
- [15] Ruckha, M., and Wilde, K., (2006). "Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beams and plates". Journal of Sound and Vibration, 297, pp. 536-550.
- [16] Katunin, A., (2010). "Identification of multiple cracks in composite beams using discrete wavelet transform". Scientific Problem of Machines Operation and Maintenance, 2(162).
- [17] Solis, M., Algaba, M., and Galvín, P., (2013). "Continuous wavelet analysis of mode shapes differences for damage detection", Mechanical Systems and Signal Processing, 40, pp. 645-666.
- [18] Katunin, A., (2015). "Stone impact damage identification in composite plates using modal data and quincunx wavelet analysis", Archives of Civil and Mechanical Engineering, 15, pp. 251-261.
- [19] Patel, S., Chourasia, A., Panigrahi, S., Parashar, J., Parvez, N., and Kumar, M., (2016). "Damage identification of RC structures using wavelet transformation", Procedia Engineering, 144, pp. 336-342.

- [20] Yang, C., Oyadiji, S. O., (2017). "Delamination detection in composite laminate plates using 2D wavelet analysis of modal frequency surface", Journal of Computers and Structures, 179, pp. 109-126.
- [21] Khanahmadi, M., Rezayfar, O., Gholhaki, M., (2019), "Damage detection in steel beams using analytical results comparison of the continuous wavelet transform of modes shape", 3rd International Conference on Applied Research in Structural Engineering and Construction Management, Sharif University of Technology.
- [22] Khanahmadi, M., Rezayfar, O., Gholhaki, M., (2019), "Damage detection in steel plates based on comparing analytical results of the discrete 2-D wavelet transform of primary and secondary modes shape", Journal of Structural and Construction Engineering, DOI: 10.22065/JSCE.2019.174347.1799.
- [23] Benedetto, J.J., Frazier, M.W., (1994). "WAVELETS: Mathematics and Applications", CRC Press, Boca Raton.
- [24] Rao, K.R., Kim, D.E., Hwang, J.J., (2005). "Fast Fourier Transform: Algorithm and Applications", Springer, Berlin Heidelberg.
- [25] Mertins, A., (1992). "Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications" Publisher: Wiley; Revised Edition (February 24, 1999).
- [26] MATLAB Reference Guide, the Math Works, Ince., 2010b.
- [27] Bagheri, A., Kourehli, S., (2013). "Damage detection of structures under earthquake excitation using discrete wavelet analysis", Asian Journal of civil engineering (BHRC), 14(2), pp. 289-304.
- [28] Abdulkareem, M., Bakhary, N., Vafaei, M., Noor, N., Padi, K., (2018). "Non-probabistic wavelet method to consider uncertainties in structural damage detection", Journal of Sound and Vibration, 433, pp. 77-98.
- [29] Hosini Vaez, S.R, Dehghani, E., Babaei, V., (2017). "Damage detection in post-tensioned slab using 2D wavelet transforms", Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 5(2), pp. 25-38.
- [30] Sarkhosh, S., (2011). " Damage detection assesment of elements in 3D-panel system", MS.C Thesis, Semnan University, Semnan, Iran.
- [31] Pastor, M., Binda, M., Harcarik, T., (2012). "Modal Assurance Criterion", Journal of Procedia Engineering, 48, pp. 543-548.