

تشخیص خرابی در ساختمان پیش ساخته پانلی آزمایش شده به روش تحلیلی آنالیز موجک پیوسته

مجتبی حنطه^۱، امید رضایی فر^{۲*}، مجید قلهکی^۳

۱. دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲. دانشیار، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳. دانشیار، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

*Orezayfar@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۹/۵/۸

چکیده

در این پژوهش به بررسی ارتعاشات آزاد یک ساختمان چهار طبقه با شرایط مرزی مشخص و پایش سلامت ساختمان بر مبنای نتایج آزمایشگاهی و به کمک روش تحلیلی آنالیز موجک پیوسته پرداخته و آسیب‌هایی که ممکن است در این سازه‌ها رخ دهند، ارزیابی و تحلیل شده است. مدل‌سازی ساختمان در نرم افزار اجزا محدود و با استفاده از مدل ساندویچی صورت پذیرفته است. در این ساختمان چهار طبقه، از ساندویچ پانلی با هشت لایه از جنس (پلی استایرن، بتن، فولاد، بتن) به صورت متقارن استفاده و چهارده فرکانس طبیعی این سازه ساندویچی با مدل آزمایشگاهی مقایسه شده، و شکل موده‌های اصلی این ساختمان که در بررسی پایش سلامت این سازه تاثیر دارد، بدست آمده است. خطای کمتر از ۲/۵ درصد هماهنگی مناسب بین نتایج دو مدل را آشکار می‌نماید. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، موقعیت خرابی به کمک تابع $coif5$ با پارامتر مقیاس ۸ نسبت به بقیه توابع موجک با موفقیت شناسایی شده و اغتشاش بیشتری از ضرایب را در محل وقوع خرابی نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که ماکزیمم‌ها و مینیمم‌های نسبی پرش در ضرایب موجک، در محل وقوع خرابی‌ها اتفاق افتاده است و 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 ۸٪ شناسایی نمود. همچنین اثر موده‌های بالاتر در نمایش شدت خرابی محسوس‌تر است به گونه‌ای که در مود پیچشی سازه، ماکزیمم ضرایب موجک بزرگ‌تر و شدت خرابی بیشتر نمایان شده است.

واژگان کلیدی: پانل سه بعدی، آنالیز موجک، پایش سلامت سازه، تشخیص خرابی، پردازش سیگنال.

۱- مقدمه

رشد چشمگیر صنعت ساختمان در سال‌های اخیر و روش ساختمان‌سازی صنعتی با رویکرد سستی، تحول زیادی در این صنعت از جمله سبکی، مقاومت، یکپارچگی، عایق بودن، سرعت نصب و سهولت در اجرا را بوجود آورده است. یکی از سیستم‌های سازه‌ای که بسیاری از ویژگی‌های ساختمان‌های صنعتی را دارد، سیستم پانل پیش ساخته سه بعدی است. همواره سازه‌ها با گذشت زمان و در طول خدمت رسانی در معرض خرابی‌ها هستند. با تجمع خرابی‌های جزئی، مشخصه‌هایی از سازه چون سختی کاهش یافته و در نتیجه، از عمر مفید آن کم و در برخی موارد سازه دچار خرابی‌های کلی می‌شود. از این‌رو، ضرورت به شناسایی محل وقوع خرابی‌ها و ارزیابی شدت آن‌ها احساس شده و مساله عیب‌یابی مطرح می‌شود. فرآیند استراتژیک تشخیص خرابی تحت عنوان پایش سلامت سازه (SHM) مطرح است. روش‌های شناسایی خرابی و ارزیابی شدت خسارت ناشی از آن‌ها در سازه‌ها به طور کلی به دو دسته روش‌های محلی^۲ و روش‌های کلی^۳ تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به محدودیت‌های روش‌های محلی به دلیل افزایش ابعاد سازه‌ها و پیچیدگی‌های هندسی آن‌ها، روش‌های کلی مبتنی بر پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی ناشی از تحریک سازه شکل گرفته‌اند. امروزه روش‌های غیرمستقیم فراوانی در رابطه با موضوع خرابی وجود دارد که از جمله این روش‌ها، می‌توان روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های فرا ابتکاری و روش‌های مبتنی بر تحلیل سیگنال‌ها چون تبدیلات فوریه و موجک را نام برد. تاکنون برای بررسی و شناخت رفتار پانل‌ها و سازه‌های پانلی و همچنین برای شناسایی و تشخیص آسیب در سازه‌ها مطالعات فراوانی انجام شده است که به برخی از آنها در ذیل اشاره می‌شود. در یک مطالعه عددی توسط کبیر و همکاران پارامترهای دینامیکی سیستم با آنالیز اجزا محدود و در ناحیه غیر خطی ارزیابی شد [1]. روفن لو در پژوهشی به بررسی مقاومت برشی

پانل‌های پیش ساخته سبک بتنی با الیاف شیشه‌ای تقویت شده با پلیمر پرداخت [2]. آریسوی و همکاران در پژوهشی به بررسی عملکرد پانل‌های ساخته شده با بتن سبک الیافی پرداختند [3]. سه نوع پانل ساخته شده با بتن الیافی با مصالح سبک و پانل ساخته شده با بتن هوادار الیافی و پانل ساخته شده با بتن الیافی متشکل از ماده هوازا و سنگدانه سبک مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفتند [4، 5]. رضایی‌فر و همکاران به بررسی رفتار دینامیکی ساختمان پیش ساخته یک طبقه بر اساس آزمایش میز لرزان پرداختند [6]. گارا و همکاران رفتار دیوارهای پانلی با اتصالات برشی غیرخرپایی را تحت بارگذاری فشاری در مرکز پانل و همچنین بارگذاری خارج از مرکز را بررسی کردند [7]. شیگانگ و همکاران در یک مطالعه عددی به بررسی رفتار کششی تک محوری، رفتار برشی و رفتار خمشی پانل‌های پیش ساخته سبک سه بعدی به روش المان محدود پرداختند [8]. در پژوهشی که کاربونای و همکاران انجام داده‌اند، سه برنامه آزمایشی متفاوت برای تعیین تأثیر تکیه‌گاه‌ها و شرایط بارگذاری مختلف بر رفتار خمشی پانل‌های پیش ساخته سه بعدی با اتصالات برشی قائم (اتصالات غیرخرپایی) در نظر گرفتند [9]. پاویز و بورناس در پژوهش‌های خود رفتار ده دیوار پانلی منفرد با بازشو و بدون بازشو را در مقیاس کامل و تحت بارهای افقی و قائم به صورت آزمایشگاهی ارزیابی کردند تا رفتار دیوارهای طره‌ای و دیوارهای با دو انتهای گیردار مقاوم در برابر بار جانبی بررسی شود [10]. با توجه به اینکه مقاومت پانل‌های سه بعدی بیشتر بستگی به اتصالات برشی بین دو لایه بتن دارد و لایه پلی استایرن در برش بسیار ضعیف است و هیچ‌گونه سهمی در مقاومت برشی اتصالات برشی ندارد بنابراین در پژوهشی الکاشف و موتی از بتن سبک هوادار به عنوان هسته عایق به جای لایه پلی استایرن در ساخت پانل‌های سه بعدی استفاده کردند تا تأثیر آن را در انتقال برش بین لایه‌های پانلی مورد بررسی قرار دهند [11]. کانگ با مطالعه روی پانل‌های

سه بعدی، رفتار کامپوزیتی و غیرکامپوزیتی آن‌ها را تحت بارگذاری خمشی گسترده مورد بررسی قرار داده است [12]. در پژوهشی که توسط کبیر و شادان انجام گرفته است، به بررسی رفتار دینامیکی یک قاب خمشی بتنی ترکیب شده با سیستم پانل سه بعدی پرداخته شده است [13]. مشعل و فیلیاترالت [14] در پژوهش‌های خود روی سیستم سازه‌ای پانل سه بعدی، مقادیر پارامترهای عملکرد لرزه‌ای شامل ضریب رفتار، ضریب کاهش شکل‌پذیری و ضریب مقاومت افزون را برای ساختمان‌های یک و دو طبقه ساخته شده با این سیستم سازه‌ای هماهنگ با روند آیین‌نامه FEMA. P-695 [15] بدست آوردند. ژانگ و اویدایچی روشی جدید برای شناسایی آسیب در تیرهای دارای ترک‌های کوچک (با نسبت ارتفاع ترک به ارتفاع تیر کمتر از ۵ درصد) ارائه دادند [16]. درمورد تشخیص خرابی در صفحات، بی سا و همکاران با استفاده از تبدیل موجک دوبعدی، روشی را ارائه دادند [17]. رضایی فر و دوست محمدی به بررسی تشخیص خرابی تیر با استفاده از روش فرکانسی پرداختند [18]. اثر مرتبه مودها بر میزان قابلیت تشخیص آسیب سازه‌ها، توسط روکا مورد بررسی قرار گرفته است [19]. سولیس و همکاران با استفاده از تبدیل موجک روشی ابتکاری را برای تشخیص خرابی ارائه نمودند [20]. قدرتی امیری و همکاران روشی برای تشخیص خرابی با استفاده از تبدیل موجک گسسته هنگامی که ترک‌های متعدد در یک تیر رخ دهند را پیشنهاد نمودند [21]. تشخیص خرابی یک ساختمان بتنی با استفاده از تبدیل موجک توسط پاتل و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [22]. باقری و همکاران روشی برای تشخیص آسیب در ورق‌ها، با استفاده از تبدیل گسسته موجک دو بعدی بر روی اطلاعات مودال ارائه نمودند [23-25]. بسخیروم و همکاران با استفاده از تبدیل موجک، روشی را برای پایش سلامت سازه یک پل ارائه نمودند [26]. کانتین با استفاده از موجک‌های ناپایدار تحت اثر انرژی‌های مختلف به تجزیه و تحلیل شکل مودهای آسیب‌دیده صفحات کامپوزیتی پرداخت [27]. یانگ و اویدایچی روش جدیدی برای شناسایی خرابی در صفحات کامپوزیتی چند لایه با

استفاده از سطح فرکانس مودال ارائه نمودند [28]. رضایی فر و همکاران در پژوهشی به شناسایی آسیب جداشدگی در ستون‌های فولادی پر شده با بتن بر اساس داده‌های مودال آزمایشگاهی پرداختند [29-30]. آن‌ها در این پژوهش آسیب جداشدگی را توسط یک لایه پلی استایرن نازک در یکی از وجوه ستون بین هسته بتنی و جداره فولادی شبیه‌سازی نمودند و با استفاده از تبدیل موجک پیوسته شکل مود موفق به شناسایی موقعیت جداشدگی هسته بتنی و جداره فولادی شدند. وانگ و همکاران برای شناسایی خرابی سازه تونلی یک شاخص خرابی جدید مبتنی بر تبدیل موجک بر اساس بردار نیروی باقی‌مانده پیشنهاد و برای مدل المان محدود تونل با انواع مختلف خرابی در موقعیت‌های مختلف استفاده نمودند [31]. باتوجه به مطالعات و پژوهش‌های صورت گرفته توسط پژوهشگران مختلف در سرتاسر جهان در زمینه بررسی ویژگی‌ها و عیب‌یابی، می‌توان نتیجه گرفت که در زمینه سازه‌های پانلی سه بعدی (3D Panel)؛ پژوهش‌های مدون، منسجم و سازماندهی شده چندان صورت نگرفته است که این موضوع ضرورت انجام این پژوهش را فراهم می‌آورد. در این پژوهش به بررسی و پایش سلامت ساختمان پیش ساخته پانلی کامل بر مبنای نتایج آزمایشگاهی و به کمک روش تحلیلی آنالیز موجک پیوسته پرداخته و آسیب‌هایی که ممکن است در این سازه‌ها رخ دهند، مورد ارزیابی و تحلیل واقع شده‌اند.

۲- آنالیز موجک

آنالیز موجک، روش جدیدی برای تحلیل سیگنال است. موجک‌ها ترکیبی از یک خانواده توابع پایه هستند که توانایی بازبینی سیگنال در محدوده زمان (یا مکان) و فرکانس (یا مقیاس) را دارند. در واقع تبدیل موجک بر این اصل استوار است که هر سیگنال می‌تواند به مجموعه‌ای از توابع موضعی که موجک نامیده می‌شود، تبدیل شود. هر نوع ویژگی موضعی یک سیگنال را می‌توان با استفاده از توابع موجکی مربوطه مورد تحلیل و بررسی قرار داد. تبدیلات موجک به نقاط تکیه‌دار سیگنال‌ها حساس هستند و می‌توان از همین

در روابط ۳ و ۴، $g(k)$ و $h(k)$ به ترتیب ضرایب فیلتر پایین گذر و بالا گذر و L اندازه فیلتر است.

از آنجا که خرابی‌های ایجاد شده در ساختمان مقادیر بزرگی هستند در نتیجه پاسخ‌های سازه به صورت اغتشاش محسوس ظاهر می‌شود. با توجه به اینکه جزئیات آنالیز موجک گسسته در نرم افزار متلب مولفه‌های فرکانس بالا را تجزیه می‌نماید و فرکانس‌های ساختمان مطالعه شده با توجه به ماهیت سازه آسیب دیده پایین است و همچنین آنالیز موجک پیوسته، محل خرابی‌ها را نسبت به فرم گسسته آنالیز موجک با حساسیت بیشتری شناسایی می‌کند در این پژوهش از آنالیز موجک پیوسته استفاده شده است.

۳- مشخصات مصالح و مدل اجزا محدود

ساختمان پیش ساخته پانلی مورد بررسی

مدل در نظر گرفته شده برای این پژوهش، ساختمان چهار طبقه ساخته شده از پانل‌های پیش ساخته سه بعدی با مقیاس ۱/۲، ۳۵ روی میز لرزان دانشگاه صنعتی شریف تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای مختلف است، به گونه‌ای که این لرزه‌ها بتواند سطح جامعی از زلزله‌ها از لحاظ انرژی و فرکانس را در برگیرد [32]. در این لرزه‌ها عکس العمل سازه با نصب ابزارهای دقیق اندازه‌گیری شده است و رفتار واقعی سازه از جمله چگونگی جذب و توزیع برش‌ها در طبقات و چگونگی شکست و سطح عملکرد تحت زمین لرزه برآورد شده است. با توجه به اینکه مقیاس مدل نسبت به نمونه اصلی ۱/۲، ۳۵ است، کلیه ابعاد از جمله قطر میلگرد نیز مقیاس شده است. در شکل (۱) جزئیات پانل‌های دیواری و سقفی مقیاس شده برای مدل نشان داده شده است. در این شکل مقطع A-A برش عرضی و مقطع B-B برش طولی است

موضوع برای پیدا کردن تغییرات تند و ناگهانی در اشکال مودی، که اغلب نشان دهنده آسیب است، استفاده کرد. آنالیز موجک در حالت کلی به دو صورت پیوسته و گسسته تعریف می‌شوند که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

۲-۱ آنالیز موجک پیوسته

اگر $x(t)$ یک سیگنال در بازه $-\infty$ تا $+\infty$ باشد، در این صورت آنالیز موجک پیوسته یک بعدی آن به صورت رابطه ۱

$$CWT(s, b) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{s} \right) dt \quad (1)$$

که در آن پارامترهای s, b به ترتیب پارامترهای انتقال^۲ و مقیاس^۳ می‌باشند و $CWT(s, b)$ ضریب موجک نامیده می‌شود. ψ نیز تابع موجک مادر نامیده می‌شود و ψ^* مزدوج مختلط ψ است. هر ضریب موجک نشان دهنده میزان همبستگی یا شباهت سیگنال اصلی به شکل موج موجک تغییر مقیاس یافته‌ی موجک مادر با پارامتر مقیاس S در حوالی نقطه b است.

۲-۲ آنالیز موجک گسسته

تبدیل موجک گسسته یک سیگنال یک بعدی $S_0(n)$ به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$s_0(n) = s_j(n) + \sum_{j < i} w_j(n) \quad (2)$$

در رابطه ۲، $s_j(n)$ و $w_j(n)$ به ترتیب تقریبات^۴ و جزئیات^۶ یک سیگنال یک بعدی در سطح i ام است که در سطح $i+1$ از روابط ۳ و ۴ به دست می‌آیند.

$$S_{i+1}(n) = \sum_{k=0}^{L-1} g(k) S_i(2n-k) \quad (3)$$

$$W_{i+1}(n) = \sum_{k=0}^{L-1} h(k) S_i(2n-k) \quad (4)$$

جدول ۱- مشخصات مصالح مصرفی

Material	Poisson Ratio	Density(kg/m ³)	Young Modulus(GPa)	Yield Stress(MPa)	Tensile Strength(MPa)	Compression Strength(MPa)
Steel bars	0.28	7855	206	470	520	-
Shotcrete	0.15	2175	15	-	2.8	24.6
Polystyrene	0.17	10	0.02	-	-	-

Table 1. Material Properties of Test Model

از المان shell نوع صفحه‌ای planer و برای تخصیص مصالح سازنده از حالت ساندویچ پانلی با هشت لایه (پلی استایرن، بتن، فولاد، پلی استایرن) به صورت متقارن استفاده شده است. خواص ذکر شده مطابق جدول (۱) است. همچنین پایه‌های ساختمان به عنوان شرایط مرزی به صورت ثابت در نظر گرفته شده است.

پس از انجام تحلیل مودال، شکل مودهای سازه استخراج و با استفاده از آنالیز موجک پیوسته، ماتریس شکل مودهای سالم و معیوب در محیط نرم افزار MATLAB مورد تحلیل واقع شده و موقعیت خرابی‌ها شناسایی می‌شود.

شکل ۳. پلان ساختمان چهار طبقه و جزئیات میز لرزان، فونداسیون و آرماتورهای تقویتی مقیاس شده (ابعاد به میلی‌متر) [32]

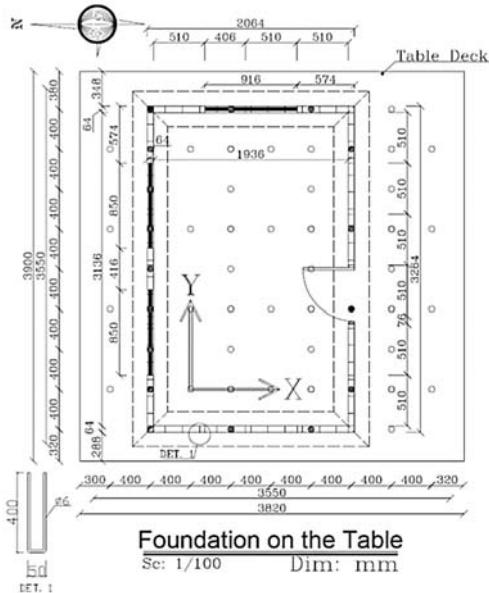


Fig. 3. Plan and Details of Shaking Table (dimensions in mm) [32]

به منظور درستی آزمایشی مدل اجزا محدود، نتایج تحلیل مودال مدل آزمایشگاهی و مدل اجزا محدود سازه سالم برای سه مود اصلی انتقالی و دورانی سازه در جدول (۲) نشان داده شده

شکل ۱. جزئیات پانل دیواری و سقفی مقیاس شده (ابعاد به میلی‌متر) [32]

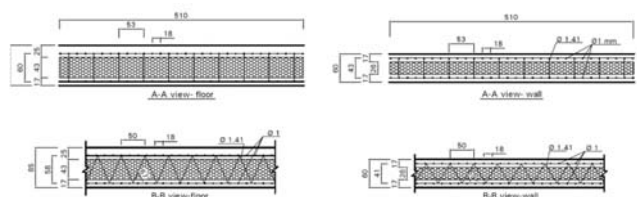


Fig. 1. Scaled Wall and Roof Panel Details (dimensions in mm) [32]

در شکل (۲) جزئیات اتصال دیوارها و سقف‌های سازه پانلی مقیاس شده برای مدل نشان داده شده است. همچنین مشخصات مصالح مصرفی به‌طور خلاصه در جدول (۱) ذکر شده است.

شکل ۲. جزئیات اتصالات مقیاس شده (ابعاد به میلی‌متر) [32]

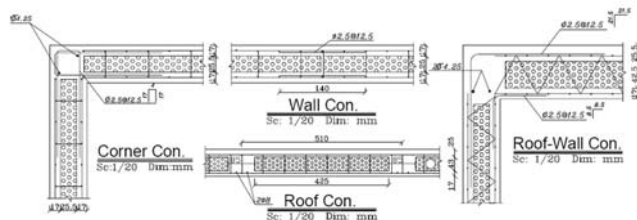


Fig. 2. Details of Scaled Connections (dimensions in mm) [32]

ابعاد اصلی سازه چهار طبقه دارای ابعاد به پلان ۴/۷ در ۷/۵ و ارتفاع ۱۳/۲ متر بوده است که با مقیاس ۱/۲,۳۵ به ابعاد به پلان ۲ در ۳/۲ و ارتفاع ۵/۶ متر تغییر پیدا می‌کند. در شکل (۳) پلان ساختمان چهار طبقه و میز لرزان به همراه فونداسیون فلزی را به صورت دقیق روی آن به همراه موقعیت آرماتورهای تقویتی نشان داده شده است. در شکل (۴) محل قرارگیری ابزارهای اندازه‌گیری اعم از جابه‌جایی سنج، کرنش سنج و شتاب سنج و در شکل (۵) نماهای کلی ساختمان در مجموعه آزمایشگاهی میز لرزان دانشگاه صنعتی شریف نشان داده شده است. برای مدل‌سازی ساختمان چهار طبقه در نرم‌افزار آباکوس

۴- بررسی تغییرات فرکانسی و شکل مودی

عکس العمل سازه تحت لرزه های مختلف با نصب ابزارهای دقیق اندازه گیری شده است و رفتار واقعی سازه تحت زمین لرزه برآورد شده است. در شکل (۷) ترک های ایجاد شده پس از لرزه ناغان-۱۳۵ درصد آزمایشگاهی (منظور از ۱۳۵ درصد یعنی رکوردهای شتاب، سرعت و جابه جایی زلزله واقعی ناغان، ۳۵ درصد افزایش یافته است) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۷) به خوبی قابل مشاهده است که بخش عمده ای از انرژی زلزله در طبقه اول و بخش کمتری در طبقه دوم با وارد شدن سازه به ناحیه غیر خطی تلف می شود. بنابراین در روند کاهش سختی سازه، طبقات اول و دوم نقش مهمتری ایفا می کنند. همچنین اطراف بازشوها از نقاط حساس سازه است که ترک ها از آنجا شروع می شود و دلیل آن وجود تمرکز تنش در این مکان ها است. نتایج تحلیل مدل آزمایشگاهی و مدل اجزا محدود سازه آسیب دیده پس از لرزه ناغان-۱۳۵ درصد برای سه مود اصلی انتقالی و دورانی سازه در جدول (۳) نشان داده شده است. همان گونه که در جدول (۳) مشخص است، هماهنگی مناسبی بین نتایج دو مدل برقرار است.

در صورت هماهنگی کامل شکل مودهای سازه سالم و آسیب دیده، هیچ گونه خرابی در سازه وجود ندارد؛ بنابراین اگر چنانچه بتوان میزان همبستگی شکل مودهای سازه سالم و آسیب دیده مودهای مختلف را بررسی نمود، می توان به مسأله وجود خرابی در سازه پاسخ داد. یکی از معیارهای اطمینان بخش برای مقایسه شکل مودهای سازه سالم و آسیب دیده، معیار همبستگی شکل مود (MAC) است که با رابطه زیر بیان می شود [33]:

$$MAC_i(U_d, D) = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i^{U_d} \phi_i^D}{\sum_{i=1}^n (\phi_i^{U_d})^2 \sum_{i=1}^n (\phi_i^D)^2} \quad (5)$$

در رابطه مذکور، $\phi_i^{U_d}$ و ϕ_i^D به ترتیب بردار شکل مود سازه سالم و آسیب دیده مود i ام هستند. مقادیر معیار همبستگی شکل مود همواره بین صفر و یک بوده و مقدار یک نشان دهنده هماهنگی کامل شکل مودها (عدم وجود آسیب) و مقادیر کمتر از یک نشان-دهنده عدم هماهنگی شکل مودها (وجود آسیب) در سازه است. در

است. همان گونه که در جدول مشخص است، هماهنگی مناسبی بین نتایج دو مدل برقرار است. همچنین در شکل (۶)، شکل سه مود اصلی انتقالی و دورانی سازه سالم، ترسیم شده است.

شکل ۴. محل قرارگیری ابزارهای اندازه گیری (ابعاد به میلی متر) [32]

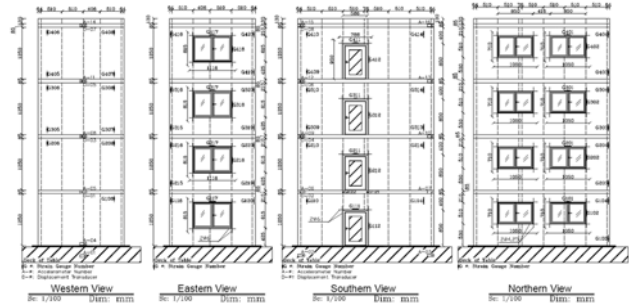


Fig. 4. Location of Measuring Instruments (dimensions in mm) [32]

شکل ۵. نماهای کلی ساختمان در مجموعه آزمایشگاهی میز لرزان [32]



Fig. 5. General Views of the Building in the Shaking Table Laboratory Complex [32]

شکل ۶. شکل مودهای سازه سالم

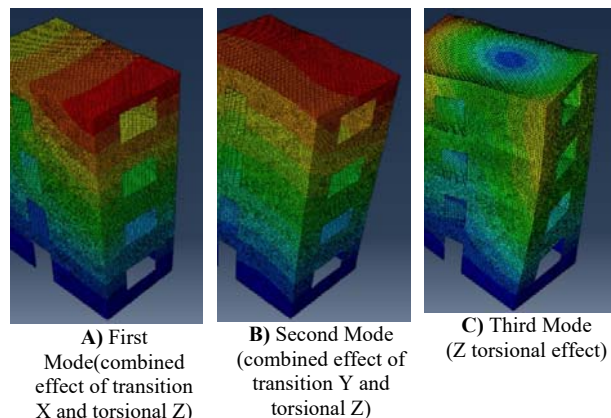


Fig. 6. Shapes of Mode for an Undamaged Structure

همان‌طوریکه مطرح شد خرابی در سازه‌ها باعث تغییر در پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی سازه می‌شود. این تغییرات ناشی از تغییر در ماتریس‌های ذاتی سازه (ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی) است؛ بنابراین، می‌توان از روی تغییرات در پاسخ‌های سازه به مسأله وجود خرابی پاسخ داد. معادله ارتعاش آزاد با میرایی یک سیستم سازه‌ای یک درجه آزادی با سختی k و جرم m و میرایی c می‌توان از تعادل نیروها با رابطه ۶ به صورت زیر بیان نمود:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (6)$$

جدول (۴) مقادیر معیار همبستگی شکل مودی نماهای مختلف سازه برای سه مود اصلی انتقالی و دورانی ارائه شده است. مشاهده می‌شود تمام مقادیر کمتر از یک است و وجود آسیب مورد تأیید است. در جدول (۵) زاویه بین بردار شکل مودهای سالم و آسیب دیده نماهای مختلف سازه برای سه مود اصلی انتقالی و دورانی ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت تمامی زوایای بین شکل مودهای حالت‌های سالم و معیوب، غیر صفر می‌باشند و این موضوع نیز وجود آسیب در ساختمان پانلی را تأیید می‌نماید.

جدول ۳. مقایسه نتایج تحلیل مودی مدل آزمایشگاهی و مدل اجزا محدود سازه آسیب دیده

Results of Modal Analysis of the Experimental Model			Results of Modal Analysis of the Finite Element Model		Error(%)	
Mode	Frequency (Hz)	Period (seconds)	Frequency (Hz)	Period (seconds)	Frequency (Hz)	Period (seconds)
1	4.00	0.250	4.02	0.249	0.50	0.40
2	5.10	0.196	5.06	0.198	0.78	1.02
3	7.50	0.133	7.67	0.130	2.27	2.25

Table 3. Comparison of Modal Analysis Results of Experimental Model and Finite Element Model of Damaged Structure

جدول ۴- مقادیر معیار همبستگی شکل مودها

Mode	South view	Northern view	Eastern view
1	0.997336972	0.996386030	0.973093364
2	0.955781953	0.881158639	0.999190116
3	0.984454411	0.990025298	0.967777825

Table 4. Modal Assurance Criterion(MAC)

جدول ۵. زاویه بین بردار شکل مودهای سالم و آسیب دیده(درجه)

Mode	South view	Northern view	Eastern view
1	2.9580	3.4465	9.4410
2	12.1388	20.1655	1.6308
3	7.1624	5.7319	10.3409

Table 5. The Angle between Shape Vector of Undamaged and Damaged Modes (Degree)

جدول ۶. مقادیر فرکانس‌های طبیعی سازه سالم و آسیب دیده مدل اجزا محدود

Mode	Frequency of Undamaged Structures (Hz)	Frequency of Damaged Structures (Hz)	Mode	Frequency of Undamaged Structures (Hz)	Frequency of Damaged Structures (Hz)
1	5.7680	4.0226	8	11.9110	11.3980
2	7.2992	5.0606	9	11.9580	11.8200
3	8.0177	7.6659	10	11.9650	11.8880
4	8.2685	8.1618	11	14.1660	11.9060
5	8.3226	8.2261	12	15.6900	13.1510
6	8.3270	8.2428	13	16.0260	15.3500
7	11.7090	9.9213	14	16.0880	15.7770

Table 6. Natural Frequencies Values of Undamaged and Damaged Finite Element Models

شکل ۱۱. نمودارهای تابع coif5 حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل مودهای سه مود اصلی سازه مربوط به طبقه اول-بالای بازشوهای نمای شمالی

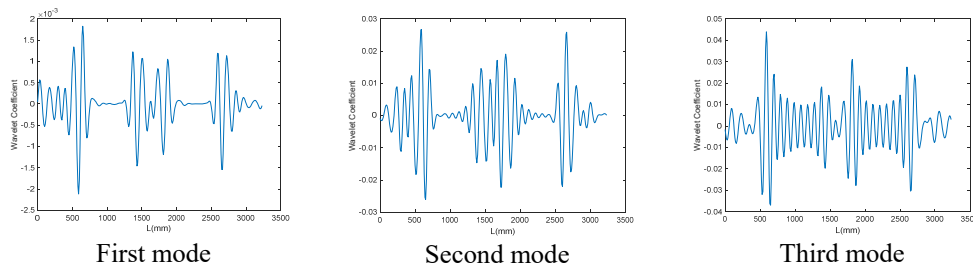


Fig. 11. Diagrams of Coif5 Function Derived from the Wavelet Analysis of Shape Differences of Three Main Modes of the Structure for the First Story above the Northern View Openings

فرکانسهای طبیعی ۱۴ مود اول سازه پانلی در حالت‌های سالم و آسیب دیده تحت زلزله ناغان-۱۳۵ درصد مدل اجزا محدود آورده شده است. همچنین در شکل (۸) نمودار درصد تغییرات فرکانسهای طبیعی سازه سالم و آسیب دیده نمایش داده شده که درصد اختلاف در مودهای اصلی بیشتر نمایان است. درصد تغییرات فرکانسهای طبیعی تأییدی بر وجود خرابی در سازه پانلی است.

جواب عمومی معادله مشخصه رابطه (۶)، از جنس توابع کسینوس و سینوس بیان می‌شود.

اگر ماتریس سختی سازه K و ماتریس جرم آن M باشد، آنگاه فرکانسهای طبیعی سازه با چشم‌پوشی از میرایی، از حل معادله مشخصه (۷) قابل محاسبه هستند.

$$\det(K - \omega^2 M) = 0 \quad (7)$$

به روشنی، کوچک‌ترین تغییر در ماتریس سختی سازه با تغییرات در ماتریس فرکانسهای طبیعی همراه خواهد بود. در جدول (۶)

شکل ۸. نمودار درصد تغییرات فرکانسهای طبیعی سازه سالم و آسیب دیده

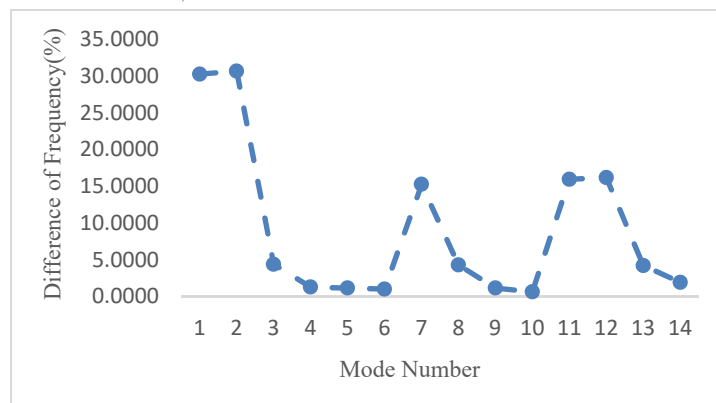


Fig. 8. Percentage of Natural Frequencies Changes of the Undamaged and Damaged Structures

شکل ۹. نمودارهای تابع coif5 حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل مودهای سه مود اصلی سازه مربوط به طبقه اول نمای جنوبی

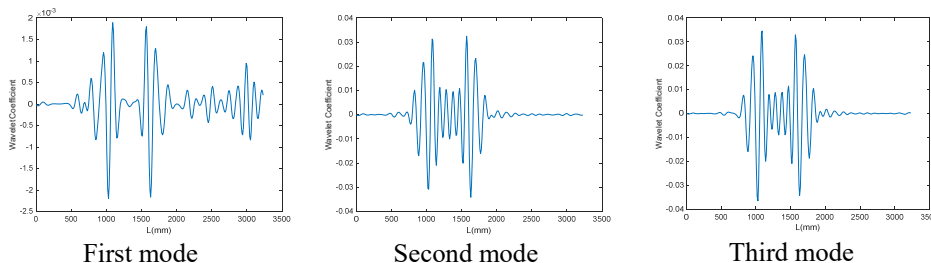


Fig. 9. Diagrams of Coif5 Function Derived from the Wavelet Analysis of Shape Difference of Three Main Modes for the First Story of the Southern View of the Building

شکل ۱۰. نمودارهای تابع coif5 حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل مودهای سه مود اصلی سازه مربوط به طبقه اول-پایین بازشوهای نمای شمالی

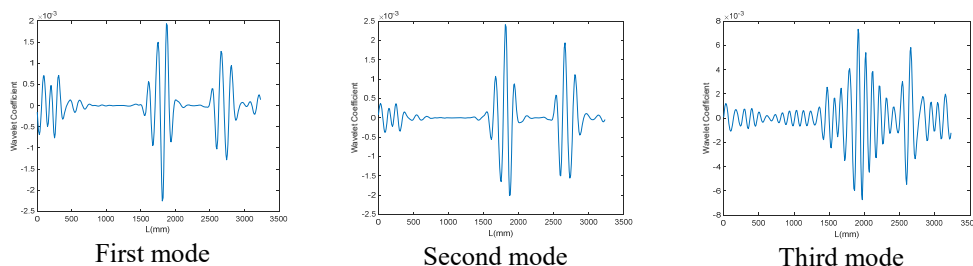


Fig. 10. Diagrams of Coif5 Function Derived from the Wavelet Analysis of Shape Differences of Three Main Modes of the Structure for the First Story Bottom the Northern View Openings

شکل ۱۲. نمودارهای تابع coif5 حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل مودهای سه مود اصلی سازه مربوط به طبقه دوم-بالای بازشوهای نمای شمالی

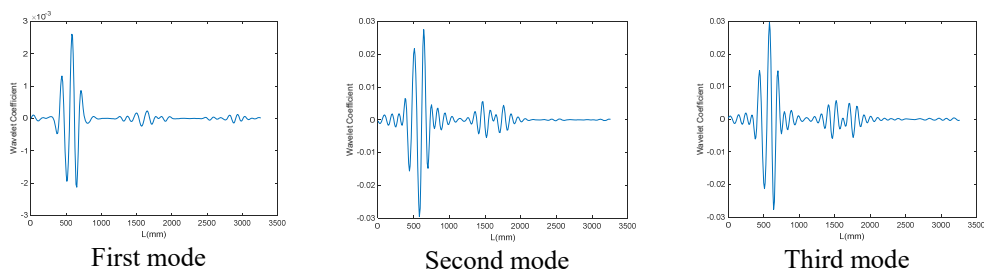


Fig. 12. Diagrams of Coif5 Function Derived from the Wavelet Analysis of Shape Differences of Three Main Modes of the Structure for the Second Story Bottom the Northern View Openings

شکل ۱۳. نمودارهای تابع coif5 حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل مودهای سه مود اصلی سازه مربوط به طبقه دوم-بالای بازشوهای نمای شمالی

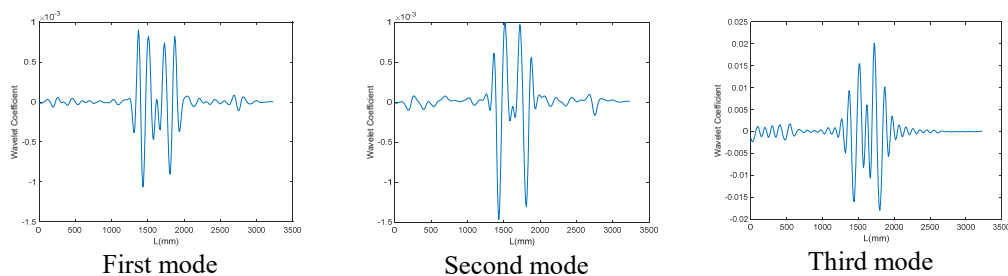


Fig. 13. Diagrams of Coif5 Function Derived from the Wavelet Analysis of Shape Differences of Three Main Modes of the Structure for the Second Story above the Northern View Openings

شکل ۱۴. نمودارهای تابع coif5 حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل مودهای سه مود اصلی سازه مربوط به طبقه اول-پایین بازشو نمای شرقی

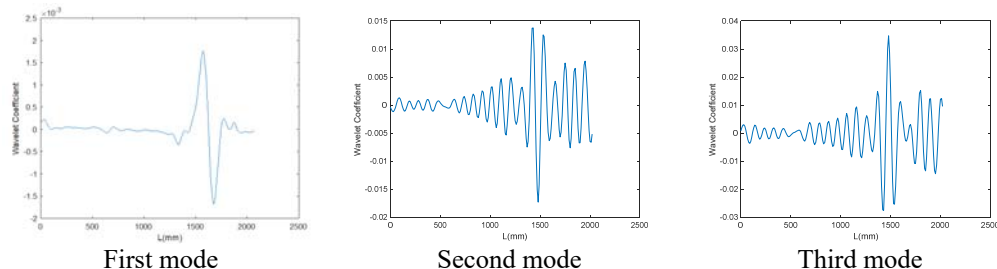


Fig. 14. Diagrams of Coif5 Function Derived from the Wavelet Analysis of Shape Differences of Three Main Modes of the Structure for the First Story Bottom the Eastern View Openings

شکل ۱۵. نمودارهای تابع coif5 حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل مودهای سه مود اصلی سازه مربوط به طبقه اول-بالای باز شو نمای شرقی

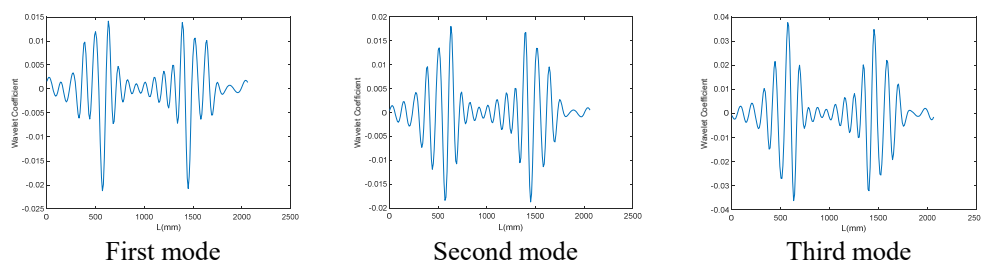


Fig. 15. Diagrams of Coif5 Function Derived from the Wavelet Analysis of Shape Differences of Three Main Modes of the Structure for the First Story above the Eastern View Openings

مورد meyr , dmey , sym , morl , mexh و gaus مورد تحلیل موجکی واقع شده و به علت محدود بودن حجم پژوهش، نتایج تابع موجک coif5 در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه نتایج مربوط به شناسایی خرابی در نماهای مختلف سازه مربوط به سه مود اصلی انتقالی و دورانی سازه بیان می‌شود.

۵-۱- تشخیص خرابی‌های نمای جنوبی سازه

در شکل (۹) نمودارهای تابع coif5 حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل مودهای سه مود اصلی انتقالی و دورانی مربوط به طبقه اول نمای جنوبی سازه آورده شده است. نمودارها نشان می‌دهد با توجه به نتایج آزمایشگاهی موقعیت خرابی به کمک تابع coif5 با پارامتر مقیاس ۸ با موفقیت شناسایی شده و در محل خرابی اغتشاش بیشتری از ضرایب موجک در شکل‌ها وجود دارد.

شکل ۱۶. مقایسه‌ی شناسایی محل ترک‌های ایجاد شده آزمایشگاهی، اجزا محدود و روش آنالیز موجک مربوط به طبقه اول نمای جنوبی سازه



Experimental

۵- شناسایی محل وقوع خرابی

امروزه روش‌های نوینی برای شناسایی خرابی در سازه‌ها ابداع شده و یک روش مفید و کارا در این زمینه، ارزیابی-های غیر مخرب ارتعاشی است. در روش‌های غیرمخرب بیشتر مشخصات آسیب‌های محتمل در سازه را با استفاده از مدل‌های تحلیلی و هماهنگی نتایج بدست آمده با مدل‌های واقعی یا آزمایشگاهی بیان می‌کنند. در این روش‌ها، بیشتر مشخصات سازه‌ای شامل اطلاعات ارتعاشی یا پارامترهای مودال به منظور تشخیص آسیب استفاده می‌شود. این روش-ها با عنوان کلی روش‌های تشخیص آسیب بر پایه اطلاعات ارتعاشی تقسیم‌بندی می‌شوند و قابل استفاده برای اغلب سیستم‌های سازه‌ای هستند. از جمله مهمترین روش‌های تشخیص آسیب بر پایه اطلاعات ارتعاشی روش‌های بر پایه فرکانس‌های طبیعی، انرژی کرنشی مودال، ماتریس انعطاف پذیری، تبدیل موجک، شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. در این پژوهش با توجه به اینکه امکان تعیین محل خرابی و قابلیت تشخیص هر نوع آسیبی با استفاده از تبدیل موجک وجود داشته و همچنین در بیشتر سازه‌ها قابل استفاده بوده و نتایج تشخیص آسیب دارای دقت بالا هست از روش تبدیل موجک برای شناسایی محل وقوع خرابی استفاده شده است.

ماتریس‌های مربوط به اختلاف شکل مودهای سازه سالم و آسیب دیده توسط تبدیل موجک پیوسته با استفاده از انواع توابع موجک از جمله Haar, db, bior, rbio, coif.

ضرایب موجک محل‌های مختلف خرابی مستقل از هم هستند. با توجه شکل‌های (۹ تا ۱۵) مشاهده می‌شود 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. در تمامی نماهای بررسی شده، اگر چنانچه ماکزیمم ضرایب موجک در محل وقوع خرابی‌ها به عنوان مرکز شناسایی شده خرابی معرفی شود، در این صورت مرکز واقعی خرابی‌ها با خطای ناچیز کمتر از ۸٪ شناسایی می‌گردد. نتایج این بررسی‌ها برای نماهای مختلف سازه برای سه مود اصلی انتقالی و دورانی برای تابع *coif5* با پارامتر مقیاس ۸ در جدول (۷) گزارش شده است. همانگونه 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. همچنین، بررسی‌ها برای شناسایی مرکز خرابی‌ها بر مبنای مینیمم ضرایب موجک تولید شده در محل وقوع خرابی‌ها صورت گرفته است. نتایج این بررسی‌ها برای نماهای مختلف سازه برای سه مود اصلی انتقالی و دورانی برای تابع *coif5* با پارامتر مقیاس ۸ در جدول (۸) گزارش شده است. مشاهده می‌شود که مرکز واقعی خرابی‌ها بر مبنای مینیمم ضرایب موجک در شدت‌های مختلف با خطای ناچیز کمتر از ۸٪ شناسایی شده و با افزایش شدت خرابی‌ها، مینیمم ضرایب موجک کاهش می‌یابد.

۷- بررسی اثر انتخاب پارامتر مقیاس مناسب در تشخیص موقعیت و شدت خرابی ساختمان

پیش ساخته پانلی کامل

انتخاب پارامتر مقیاس مناسب در آنالیز موجک اهمیت بسیار بالایی دارد. مقیاس‌های بالا برای شناسایی آسیب‌های کوچک و مقیاس‌های پایین برای تشخیص آسیب‌های نزدیک تکیه‌گاه توصیه می‌شود. در جدول (۹) مقایسه اثر پارامتر مقیاس (S)

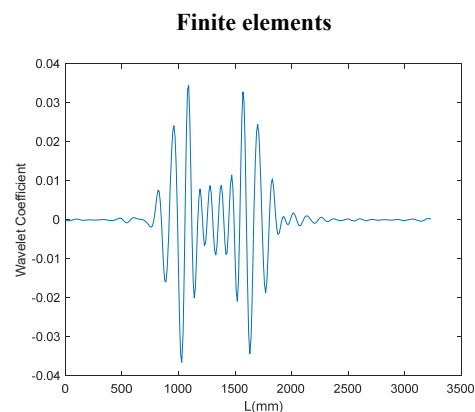
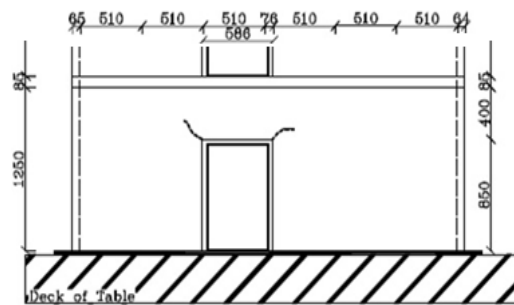


Fig. 16. Comparison of Location of Experimental Cracks, Finite Elements and Wavelet Analysis Method Related to the First Story of the Southern View of the Building

۵-۲- تشخیص خرابی‌های نمای شمالی سازه

در شکل‌های (۱۰ تا ۱۳) نمودارهای تابع *coif5* حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل مودهای سه مود اصلی انتقالی و دورانی مربوط به طبقات اول و دوم نمای شمالی سازه آورده شده است. مشاهده می‌شود که در محل خرابی اغتشاش بیشتری از ضرایب موجک در شکل‌ها وجود دارد و موقعیت خرابی با موفقیت شناسایی شده است.

۵-۳- تشخیص خرابی‌های نمای شرقی سازه

در شکل‌های (۱۴ و ۱۵) نمودارهای تابع *coif5* حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل مودهای سه مود اصلی انتقالی و دورانی مربوط به طبقه اول نمای شرقی سازه آورده شده است. مشاهده می‌شود که در محل خرابی اغتشاش بیشتری از ضرایب موجک در شکل‌ها وجود دارد و موقعیت خرابی با موفقیت شناسایی شده است.

۶- نتایج و تفسیر آن‌ها

بررسی‌های مقایسه‌ای ضرایب موجک تولید شده در محل آسیب‌های نماهای مختلف سازه، نشان می‌دهد که حساسیت

نتایج مربوط به شناسایی خرابی در نماهای مختلف سازه مربوط به سه مود اصلی انتقالی و دورانی نشان می‌دهد تابع coif5 با پارامتر مقیاس ۸ علاوه بر شباهت فرکانسی با محتوای فرکانسی ساختمان موردنظر، محتوای فرکانسی بالایی نیز داشته و با توجه به سختی بالای ساختمان می‌تواند در صورت وجود اغتشاشات کوچک به وجود آمده در اثر آسیب در پاسخ‌های سازه، آنها را نیز به خوبی و با دقت بالایی شناسایی نماید. برای نمونه مطابق شکل (۱۶)، مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عددی مربوط به طبقه اول نمای جنوبی سازه نشان دهنده دقت بالای شناسایی آسیب به کمک این تابع می‌باشد.

برای تابع موجک coif5 در تشخیص موقعیت و شدت خرابی برای سه مود اصلی انتقالی و دورانی مربوط به بیش‌ترین درصد دقت بر مبنای ماکزیمم و مینیمم ضرایب موجک نماهای مختلف سازه ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد پارامتر مقیاس ۸ بیش‌ترین درصد دقت در شناسایی موفق خرابی با توجه به نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با سایر پارامترها را دارد.

۸- جمع‌بندی تشخیص خرابی ساختمان پیش ساخته پانلی کامل

جدول ۷. شناسایی مرکز خرابی‌ها بر مبنای ماکزیمم ضرایب موجک

View	Story	Location	Damage Range (mm)	Mode	Maximum Wavelet Coefficients	Actual Center of Damage (mm)	Damage Detected Center (mm)	Error(%)
Southern	First	Above Opening	884-1084	1	1.9*10 ⁻³	984	1024	4.06
				2	32*10 ⁻³	984	1024	4.06
				3	36*10 ⁻³	984	1024	4.06
			1670-1870	1	1.8*10 ⁻³	1770	1670	5.65
				2	33*10 ⁻³	1770	1670	5.65
				3	34*10 ⁻³	1770	1670	5.65
Northern	First	Bottom Openings	1590-1840	1	1.9*10 ⁻³	1715	1750	2.04
				2	2.4*10 ⁻³	1715	1750	2.04
				3	7.5*10 ⁻³	1715	1750	2.04
			2690-2790	1	1.3*10 ⁻³	2740	2700	1.46
				2	1.9*10 ⁻³	2740	2700	1.46
				3	5.9*10 ⁻³	2740	2700	1.46
		Above Openings	324-574	1	1.8*10 ⁻³	484	515	6.40
				2	28*10 ⁻³	484	515	6.40
				3	44*10 ⁻³	484	515	6.40
			1424-1524	1	1.2*10 ⁻³	1474	1450	1.63
				2	15*10 ⁻³	1474	1450	1.63
				3	18*10 ⁻³	1474	1450	1.63
		Second	1740-1840	1	1.1*10 ⁻³	1790	1800	0.56
				2	19*10 ⁻³	1790	1800	0.56
				3	31*10 ⁻³	1790	1800	0.56
			2690-2940	1	1.2*10 ⁻³	2815	2750	2.31
				2	26*10 ⁻³	2815	2750	2.31
				3	28*10 ⁻³	2815	2750	2.31
	Bottom Openings	474-574	1	2.8*10 ⁻³	524	555	5.92	
			2	28*10 ⁻³	524	555	5.92	
			3	30*10 ⁻³	524	555	5.92	
		1424-1524	1	0.85*10 ⁻³	1474	1490	1.08	
			2	1*10 ⁻³	1474	1490	1.08	
			3	15*10 ⁻³	1474	1490	1.08	
		1740-1840	1	0.75*10 ⁻³	1790	1800	0.56	
			2	0.95*10 ⁻³	1790	1800	0.56	
			3	20*10 ⁻³	1790	1800	0.56	
				1	1.8*10 ⁻³	1605	1495	6.85

Eastern	First	Bottom	1490-1740	2	$14*10^{-3}$	1605	1495	6.85
		Opening		3	$36*10^{-3}$	1605	1495	6.85
				1	$14*10^{-3}$	494	535	7.66
			374-574	2	$18*10^{-3}$	494	535	7.66
		Above		3	$38*10^{-3}$	494	535	7.66
		Opening		1	$14*10^{-3}$	1590	1475	7.23
			1490-1690	2	$17*10^{-3}$	1590	1475	7.23
				3	$37*10^{-3}$	1590	1475	7.23

Table 7. Determination of Damage Center Based on Maximum Wavelet Coefficients

جدول ۸ شناسایی مرکز خرابی‌ها بر مبنای مینیمم ضرایب موجک

View	Story	Location	Damage Range (mm)	Mode	Minimum Wavelet Coefficients	Actual Center of Damage (mm)	Damage Detected Center (mm)	Error(%)	
Southern	First	Above Opening	884-1084	1	-2.3*10 ⁻³	984	1000	1.63	
				2	-32*10 ⁻³	984	1000	1.63	
				3	-39*10 ⁻³	984	1000	1.63	
			1670-1870	1	-2.3*10 ⁻³	1770	1690	4.52	
				2	-35*10 ⁻³	1770	1690	4.52	
				3	-37*10 ⁻³	1770	1690	4.52	
Northern	First	Bottom Openings	1590-1840	1	-2.1*10 ⁻³	1715	1800	4.96	
				2	-2.3*10 ⁻³	1715	1800	4.96	
				3	-7*10 ⁻³	1715	1800	4.96	
			2690-2790	1	-1.3*10 ⁻³	2740	2750	0.36	
				2	-1.5*10 ⁻³	2740	2750	0.36	
				3	-5.8*10 ⁻³	2740	2750	0.36	
		324-574	1	-2.1*10 ⁻³	484	520	7.43		
			2	-23*10 ⁻³	484	520	7.43		
			3	-37*10 ⁻³	484	520	7.43		
		Above Openings	1424-1524	1	-1.4*10 ⁻³	1474	1470	0.27	
				2	-14*10 ⁻³	1474	1470	0.27	
				3	-19*10 ⁻³	1474	1470	0.27	
			1740-1840	1	-1.2*10 ⁻³	1790	1750	2.23	
				2	-23*10 ⁻³	1790	1750	2.23	
				3	-27*10 ⁻³	1790	1750	2.23	
		Second	Bottom Openings	474-574	1	-1.65*10 ⁻³	2815	2700	4.08
					2	-23*10 ⁻³	2815	2700	4.08
					3	-30*10 ⁻³	2815	2700	4.08
	1740-1840			1	-2.1*10 ⁻³	524	565	7.25	
				2	-28*10 ⁻³	524	565	7.25	
				3	-30*10 ⁻³	524	565	7.25	
	Eastern	First	Bottom Opening	1490-1740	1	-1.7*10 ⁻³	1605	1480	7.78
					2	-17*10 ⁻³	1605	1480	7.78
					3	-27*10 ⁻³	1605	1480	7.78
374-574				1	-18*10 ⁻³	494	515	4.08	
				2	-21*10 ⁻³	494	515	4.08	
				3	-37*10 ⁻³	494	515	4.08	
Above Opening	1490-1690		1	-18*10 ⁻³	1590	1490	6.29		
			2	-21*10 ⁻³	1590	1490	6.29		
			3	-33*10 ⁻³	1590	1490	6.29		

Table 8. Determination of Damage Center Based on Minimum Wavelet Coefficients

جدول ۹. مقایسه اثر پارامتر مقیاس (S) در تشخیص خرابی برای تابع موجک coif5

Wavelet Coefficients	View	S=4	S=6	S=8	S=10	S=12	S=14
Maximum	Southern	88.50%	92.20%	94.35%	90.55%	86.40%	83.65%
	Northern	87.75%	90.40%	93.60%	89.70%	85.25%	82.95%
	Eastern	86.20%	89.25%	92.34%	87.90%	84.60%	82.20%
Minimum	Southern	89.45%	93.65%	95.48%	91.70%	87.25%	84.55%
	Northern	86.85%	89.45%	92.57%	88.80%	84.65%	82.55%
	Eastern	86.12%	89.15%	92.22%	87.45%	84.15%	81.25%

Table 9. Comparison of the Effect of Scale Parameter(S) on Damage Detection for Coif5 Wavelet Function

۹- نتیجه گیری

امروز پایش سلامت سازه‌ها به منظور تأمین ایمنی با کمترین هزینه با ترمیم و یا تعویض به موقع المان‌های معیوب، امری مهم و ضروری است. در گذشته روش‌های مخرب (روش‌های آزمایشگاهی) و روش‌های غیر مخرب محلی (مانند بازرسی‌های چشمی) برای سنجش سلامت سیستم سازه‌ها بکار گرفته می‌شد که با توجه به بزرگی ابعاد و پیچیدگی هندسه سازه، دچار محدودیت‌هایی هستند. به همین دلیل، امروزه روش‌های غیر مستقیم مبتنی بر تحلیل پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی سازه مورد توجه واقع شده‌اند. از جمله این روش‌ها، روش‌های بر مبنای تحلیل سیگنال چون ابزار ریاضی تبدیل موجک است که با استفاده از آن و با در نظر گرفتن شکل مودهای سازه به عنوان یک سیگنال پردازشی می‌توان به مسئله عیب‌یابی در سازه‌ها پرداخت. در این پژوهش به بررسی و پایش سلامت ساختمان پیش ساخته پانلی کامل بر مبنای نتایج آزمایشگاهی لرزه‌ای روی میز لرزان و به کمک روش تحلیلی آنالیز موجک پیوسته پرداخته و آسیب‌هایی که ممکن است در این سازه‌ها رخ دهند، مورد ارزیابی و تحلیل واقع شده‌اند. چهارده فرکانس طبیعی این سازه ساندویچی با مدل آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته و شکل مودهای اصلی این ساختمان که در بررسی پایش سلامت این سازه تأثیر دارد، بدست آمده است. خطای کمتر از ۲/۵ درصد هماهنگی مناسب بین نتایج دو مدل را آشکار می‌نماید. در مرحله اول از شناسایی خرابی، تغییرات در مقادیر فرکانس‌های طبیعی و همچنین، عدم سازگاری شکل مودهای سالم و آسیب دیده بر اساس معیار اطمینان مودال (MAC) و زاویه بین شکل مودها، وجود خرابی در سازه را تأیید نمود. ماتریس‌های مربوط به

اختلاف شکل مودهای سازه سالم و آسیب دیده توسط تبدیل موجک پیوسته با استفاده از تابع موجک coif5 مورد تحلیل موجکی واقع شده‌اند. نتایج بررسی و پایش سلامت ساختمان پیش ساخته پانلی کامل نشان می‌دهد با توجه به نتایج آزمایشگاهی موقعیت خرابی به کمک تابع coif5 با پارامتر مقیاس ۸ نسبت به بقیه توابع با موفقیت شناسایی شده و اغتشاش بیشتری از ضرایب را در محل وقوع خرابی نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که ماکزیمم‌ها و مینیمم‌های نسبی پرش در ضرایب موجک، در محل وقوع خرابی‌ها اتفاق افتاده است. 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 ۸٪ 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. اغتشاشات ضرایب موجک هر یک از محل‌های خرابی مستقل از محل خرابی دیگر با شدت‌های مختلف است. تأثیر آسیب روی نمودارهای ضرایب موجک در مقیاس‌های پایین، فشرده‌تر است و محل اغتشاش را با وضوح بالاتری نشان می‌دهد. در حالی که افزایش ضریب مقیاس که متناظر با کاهش فرکانس است، باعث پهن‌تر شدن اغتشاش شده و وضوح کمتر می‌شود. همچنین اثر مودهای بالاتر در نمایش شدت خرابی محسوس‌تر است به گونه‌ای که در مود پیچشی سازه، ماکزیمم ضرایب موجک بزرگ‌تر و شدت خرابی بیشتر نمایان شده است. علاوه-براین در روند کاهش سختی سازه، طبقات اول و دوم نقش مهمتری ایفا نموده و اطراف بازشوها از نقاط حساس سازه است

- structural wall system. *Engineering Structures*. 33, 2049-2062.
- [11] Elkashef, M. and Mooty, M.A. (2014). Investigating the use of autoclaved aerated concrete as an infill in reinforced concrete sandwich panels. *Materials and Structures*. 48, 298-312.
- [12] Kang, J. (2015). Composite and Non-Composite Behaviors of Foam-insulated Concrete Sandwich Panels. *Composites*. 68, 153-161.
- [13] Kabir, M.Z. and Shadan, P. (2012). Seismic Performance of 3D Panel Wall on Piloti RC Frame Using Shaking Table Equipment. *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics*.
- [14] Mashal, M. (2012). Quantification of seismic performance factors for buildings incorporating three-dimensional construction system. in *Proceeding NZSEE, New Zealand*.
- [15] FEMA. P-695. (2010). Quantification of Building Seismic Performance Factors. ed. prepared by Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency: Washington D.C.
- [16] Zhong, S. and Oyadiji, S.O. (2011). Detection of cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed modal data. *Computers and structures Journal*. 1 (89), 127-148.
- [17] Bayissa, W., Haritos, N., and Thelandersson, S. (2008). Vibration-based Structural Damage Identification Using Wavelet Transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 22, 1194-1215.
- [18] Rezaifar, O., Doost Mohammadi, M.R. (2016). Damage Detection of Axially Loaded Beam: A Frequency-Based Method. *Civil Engineering Infrastructures Journal*. 49(1), 165-172.
- [19] Rucka, M. (2011). Damage Detection in Beams Using Wavelet Transform on Higher Vibration Modes. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 49, 399-417.
- [20] Solís, M., Algaba, M., and Galvín, P. (2013). Continuous wavelet analysis of mode shapes differences for damage detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 40, 645-666.
- [21] Ghodrati Amiri, G., Jalalinia, M., Hosseinzadeh, A.Z., and Nasrollahi, A. (2015). Multiple Crack Identification in Euler Beams by Means of B-spline Wavelet. *Archive of Applied Mechanics*. 85, 503-515.
- [22] Patel, S., Chourasia, A., Panigrahi, S., Parashar, J., Parvez, N., and Kumar, M. (2016). که ترک‌ها از آنجا شروع می‌شود و دلیل آن وجود تمرکز تنش در این مکان‌ها است.
- ### ۱۰- مراجع
- [1] Kabir, M.Z., Rezaifar, O. and Rahbar, M.R. (2004). Non-Linear Dynamic Behavior of Combined System On Rc Frame Precast 3D Wall Panels with Irregularities in Vertical Stiffness. *13th World Conference On Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada*.
- [2] Ruifen, L., chris, P. (2013). Shear strength of GFRP reinforced precast lightweight concrete panels. *Construction and Building Materials*. 48, 51-58.
- [3] Arisoy, B. and Wu, H.C. (2008). performance of a fiberreinforced lightweight concrete panel. *Institution of civil engineering*. 157-162.
- [4] Arisoy, B. and Wu, H.C. (2008). Material characteristics of high performance lightweight concrete with PVA. *Journal of Construction and Building Materials*. 22, 635-645.
- [5] Arisoy, B. (2002). Development and Fracture Evaluation of High Performance Fiber Reinforced Lightweight Concrete. PhD thesis, Department of Civil & Environmental Engineering, Wayne State University, Detroit, MI, USA.
- [6] Rezaifar, O., Kabir, M.Z., Taribakhsh, M., and Tehranian, A. (2008). Dynamic Behavior of 3D-Panel single-story system using shaking table testing. *Journal of Engineering Structures*. 30, 318-337.
- [7] Gara, F., Ragni, L., Roia, D. and Dezi, L. (2012). Experimental Tests and Numerical Modelling of Wall Sandwich Panels. *Engineering Structures*. 37, 193-204.
- [8] Shigang, A., Yiqi, M., Yongmao, P., Daining, F. and Liqun, T. (2013). Effect of Stitching Angle on Mechanical Properties of Stitched Sandwich Panels. *Materials & Design*, 50, 817-824.
- [9] Carbonari, G., Cavalaro, S.H.P., Cansario, M.M., Aguado A. (2012). Flexural Behaviour of Light-Weight Sandwich Panels Composed by Concrete and EPS. *Construction and Building Materials*. 35, 792-799.
- [10] Pavese, A. and Bournas, D. (2011). Experimental assessment of the seismic performance of a prefabricated concrete

- [30] Younesi, A., Rezayfar, O., Gholhaki, M., and Esfandiari, A. (2019). Structural health monitoring of a concrete-filled tube column. *Magazine of Civil Engineering*. 85(1), 136-145.
- [31] Wang, S., Li, J., Luo, H., Zhu, H. (2019). Damage identification in underground tunnel structures with wavelet based residual force vector. *Journal of Engineering Structures*. 178, 506-520.
- [32] Kabir, M.Z., Rezaifar, O. (2019). Shaking table examination on dynamic characteristics of a scaled down 4-story building constructed with 3D-panel system. *Journal of Structures*. 20, 411-424.
- [33] Pastor, M., Binda, M., and Harcarik, T. (2012). Modal Assurance Criterion. *Journal of Procedia Engineering*. 48, 543-548.
- Damage Identification of RC Structures Using Wavelet Transformation. *Procedia Engineering*. 144, 336-342.
- [23] Bagheri, G., Ghodrati Amiri, G., Khorasani, M. (2010). Structural Damage Identification of Plates Based on Modal Data Using 2d Discrete Wavelet Transform. *Journal of Structural Engineering and Mechanics*. 40, 13-28.
- [24] Bagheri, G., Ghodrati Amiri, G., Seyed Razzaghi, S.A. (2009). Vibration-Based Damage Identification of Plates Structure via Curvelet Transform. *Journal of Sound and Vibration*. 327, 593-603.
- [25] Ghodrati Amiri, G., Bagheri, G., Seyed Razzaghi, S.A., Asadi, A. (2009). Structural Damage Detection in Plates Using Wavelet Transform. *Proceedings of the Fifth International Structural Engineering and Construction Conference (ISEC-5)*, Las Vegas, USA, Sept. 22-25.
- [26] Beskhyroum, S., Oshima, T., Mikami, S. (2010). Wavelet based technique for structural damage detection. *Structural control and health monitoring*. 17, 473-494.
- [27] Katunin, A. (2015). Stone impact damage identification in composite plates using modal data and quincunx wavelet analysis. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 15, 251-261.
- [28] 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, 109-126.
- [29] Rezayfar, O., Younesi, A., Gholhaki, M., and Esfandiari, A. (2018). Debonding damage detection in concrete filled tube columns by experimental modal data. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*. (in persian)

Damage Detection in Precast Panel Building Tested by Continuous Wavelet Analysis Analytical Method

Mojtaba Hanteh¹, Omid Rezaifar^{2*}, Majid Gholhaki³

1- PhD candidate - Structure Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

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

3- Associate Professor - Civil Engineering Department, Semnan University, Semnan, Iran

*Orezayfar@semnan.ac.ir

Abstract

Damage occurrence is always inevitable in structures. So far, many examples of damage types in engineering structures have been recorded with many losses of human and financial. For this reason, the detecting of structural damages during its exploitation to provide safety with the lowest cost has been the subject of many researchers in the last two decades. In this regard, the wavelet transform is a powerful mathematical tool for signal processing, has attracted the attention of many researchers in the field of health monitoring of structures. Wavelets are a combination of a family of basic functions that are capable of detecting signals in the time (or location) and frequency (or scale) range. In fact, wavelet transform is based on the principle that any signal can be transformed into a set of local functions called wavelets. Any local feature of a signal can be analyzed using the corresponding wavelet functions. The wavelet transforms to the singularities points in the signals are sensitive and can be used to detect abrupt changes in modes, which often indicate damage. In this study, free vibrations of a four-story building with specified boundary conditions have been investigated and monitored the health of the building basis on experimental results using the continuous wavelet analytical method are studied and the damage that may occur in these structures has been evaluated and analyzed. Building modeling is done in finite element software using the sandwich model. In this four-story building, eight-layer sandwich panel (polystyrene, concrete, steel, concrete) is used symmetrically. The fourteen natural frequencies of the sandwich structure were compared with the experimental model. and the main modes of the structure obtained to influence the health of the structure. An error of less than 2.5% reveals a good match between the results of the two models. Changes in the values of natural frequencies and also the inconsistency of the modes shape , based on Modal Assurance Criterion (MAC) and the angle between modes of shape confirm the damage of the structure. Precast panel health monitoring results show that based on the experimental results, the damage location using the coif5 function with scale parameter 8 has been successfully identified and shows a higher perturbation of the coefficients at the damage locations than the other functions. Thus, the relative maximum and minimum jumps in the wavelet coefficients occurred at the location of the damage and considering the maximum or minimum wavelet coefficients generated at the damage location as the center of damage, the damage center can be identified with an error of less than 8%. The disturbance of the wavelet coefficients of each of the damage locations are independent of the other damage locations with different intensities. Also, the effect of higher modes is more pronounced in the damage intensity index as in the torsional modes of the structure, the maximum wavelet coefficients are greater and the intensity of the damage is increased. In addition, in the process of reducing the structural stiffness, the first and second stories play a more important role, and around the openings are the critical points of the structure.

KeyWords:3D Panel, Wavelet Analysis, Structural Health Monitoring, Damage Detection, Signal Processing.